MAZDA TECHNICAL REVIEW

マツダ技報 2021 No.38

マツダ技報
Mazda Technical Review

2021 No.38

マツダ技報　第38号　（2021）

目　次

巻頭言 …… 小島岳二 …… 1

特集：MAZDA MX-30

1．MX-30 のデザイン …… 松田陽一 …… 3

2．MX-30 の紹介 …… 竹内都美子，上藤和佳子，岡田譲太 …… 9
岩永未央，信本昇二

3．エレクトリック G-ベクタリング コントロール プラス（e-GVC Plus）の開発 …… 梅津大輔，塚野孝俊，小川大策 …… 13
藪中　翔，加藤史律

4．MX-30 EV MODEL のモーターペダル開発 …… 森下慎也，梅津大輔，光永誠介 …… 20
津田　顕，岡田光平，服部之総

5．MX-30 エレキシフトシステムの開発 …… 木村隆浩，徳永幸司，上村裕樹 …… 26
岩本武尊，延河克明，岡山裕之

6．BEV のバッテリーを使い切る技術 …… 橋坂　明，若山敬平，江角圭太郎 …… 32
田中健治，塚本直樹，岡田光平

7．MX-30 EV MODEL への MBD の適用 …… 三戸秀樹，北川浩之，鴫濱真悟 …… 38
明神未季，田中大介

8．MX-30 高電圧システム制御の紹介 …… 藤岡真也，川田卓二，北川浩之 …… 43

9．MX-30 EV MODEL の外部充電システム開発 …… 土井政寛，徳永隆司，藤原康祐 …… 48

10．高電圧電池パックの耐振動性開発 …… 伊藤智昭，丹羽貴大，花田　裕 …… 52
岸田直樹，鍋島範之

11．MX-30 BEV & B ピラーレスボディー開発 …… 山田守英，松田大和，久保田陽満 …… 57
銭谷恒明，森本　誠，三石直人
後藤英貴

12．MX-30 の衝突安全性能 …… 濵田隆志，廣田和起，河野勝人 …… 62
古賀俊之，石倉一孝，川船良祐

13．マルチパワーソース車における外観品質の造り込み …… 石井哲雄，梶原彰人，吉崎真吾 …… 67
江口　覚，中塚勇輝，山田孝行

14．MX-30 省エネルギー 3 トーン塗装の開発 …… 永田浩太郎，服部博晃，松元貴大 …… 73

論文・解説

15．Self-empowerment Driving Vehicle の開発 …… 栃岡孝宏，田内一志，前堂勝久 …… 79
山本友也，和泉知示，石崎大智
富井圭一，任田　功，岩瀬貴志

16．新型 1.5L ガソリンエンジンの紹介 …… 小田裕介，上村　匠，吉田　健 …… 86
山内道広，西田智宣，平林千典

17．視認行動と運転操作に基づくドライバー体調急変の早期検知技術 …… 桑原潤一郎，岩瀬耕二，岩下洋平 …… 91
山本康典，一杉正仁

18．走行環境の特徴を利用した危険予測技術 …… 菅野　崇，黒田康秀，伏間丈悟 …… 98
山本康典，齊藤裕一

19．被水シミュレーションを用いた実車被水量の予測技術 …… 丸山　慧，土屋明宏，吉田敏弘 …… 105
山根貴和，上岡孝志，落岩克哉

20．高精度ダイカストによる機械加工レス成形の実現 …… 佐々木大地，重里政考，山本綾人 …… 111
河野一郎，藤井祥平，小国英明

21．CO_2 と VOC を同時に削減する VOC 回収技術の実現 …… 加藤　雄，篠田雅史，寺本浩司 …… 117

22．AI を用いた検査工程の精緻化・合理化への取り組み …… 生田目琢哉，堀元直生，大谷　崇 …… 120
岩永健太，西野恭弘

23．デジタル動作解析による技能伝承システムの開発と実用化 … 佐伯千春，久保祐貴，須賀　実 …… 127
江草秀幸，大田敦史

24．塗装部の耐食性迅速評価技術のモデルベース研究開発 …… 浅田照朗，佐々木將展，江﨑達哉 …… 133
重永　勉，髙見明秀

25．MBD/MBR の実現に向けた，繊維強化樹脂複合材内部における微視的破壊現象の可視化／評価技術 …… 河村　力，高橋拓也，住田弘祐 …… 139
杉山哲也，上田政人，米山　聡
轟　　章，宮永俊明，西田健二
横関智弘，樋口　諒

26．車両機能と材料特性をつなぐマルチスケール解析技術の研究 … 西田健二，氷室雄也，河村　力 …… 144
本田正徳，藤元伸悦

27．ガウス過程回帰を用いたソフトセンサー技術に関する研究 …
―エンジン筒内の空気充填効率の推定について― 小川史恵，桑原一徳，平野拓男 …… 150
目良　貢，和田正義，松江浩太

28．無次元数による噴霧の分裂特性の統一的整理 …… 倉持　晃，原田雄司，永澤　健 …… 156
瀬戸祐利，山下洋幸

29．微細粒を用いた粒状体ダンパの振動減衰性に関する研究 …… 阪井博行，市川和男，小湊裕允 …… 162
中野光一，坂木民司，竹澤晃弘
北村　充

社外への発表論文一覧表 …… 169

Mazda Technical Review No.38

CONTENTS

Foreword

(*T. Kojima*) 1

Special Edition for Mazda MX-30

1. Design of MX-30
   (Y. Matsuda) 3
2. Introduction of MX-30
   (T. Takeuchi, W. Uefuji, J. Okada, M. Iwanaga, S. Nobumoto) 9
3. Development of electric G-Vectoring Control Plus (e-GVC Plus)
   (D. Umetsu, T. Tsukano, D. Ogawa, S. Yabunaka, F. Kato) 13
4. Motor Pedal Technology for New Mazda MX-30 EV Model
   (S. Morishita, D. Umetsu, S. Mitsunaga, A. Tsuda, K. Okada, Y. Hattori) 20
5. Development of Electronic Shifting System for MX-30
   (T. Kimura, K. Tokunaga, H. Uemura, T. Iwamoto, K. Nobukawa, H. Okayama) 26
6. Maximizing Battery Performance for BEVs
   (A. Hashizaka, N. Wakayama, K. Ezumi, K. Tanaka, N. Tsukamoto, K. Okada) 32
7. Application of Model Base Development to MX-30 EV Model
   (H. Mito, H. Kitagawa, S. Shigihama, M. Myojin, D. Tanaka) 38
8. High Voltage Control System for MX-30
   (S. Fujioka, T. Kawada, H. Kitagawa) 43
9. Electric Vehicle Charging System Development for MX-30
   (M. Doi, R. Tokunaga, K. Fujiwara) 48
10. Vibration Resistance Development for High Voltage Battery Technology
    (T. Ito, T. Niwa, Y. Hanada, N. Kishida, N. Nabeshima) 52
11. Development of BEV Model and B Pillarless Body Structure for All-New Mazda MX-30
    (M. Yamada, Y. Matsuda, H. Kubota, T. Zenitani, M. Morimoto, N. Mitsuishi, H. Goto) 57
12. Passive Safety of MX-30
    (T. Hamada, K. Hirota, K. Kouno, T. Koga, K. Ishikura, R. Kawafune) 62
13. Built-In Appearance Quality in Multi-Power Sources Vehicle
    (T. Ishii, A. Kajihara, S. Yoshizaki, S. Eguchi, Y. Nakatsuka, T. Yamada) 67
14. Development of Energy-Saving 3-Tone Paint Process for MX-30
    (K. Nagata, H. Hattori, T. Matsumoto) 73

Technical Reports

15. Development of Self-empowerment Driving Vehicle
    (T. Tochioka, K. Tauchi, K. Maedo, T. Yamamoto, T. Izumi, D. Ishizaki, K. Tomii, I. Toda, T. Iwase) 79
16. Introduction of a New 1.5-Liter Gasoline Engine
    (Y. Oda, T. Uemura, K. Yoshida, M. Yamauchi, T. Nishida, K. Hirabayashi) 86

17. Early Detection of Deterioration of Driver's Physical Conditions from Driver's Viewing Action and Driving Action
(J. Kuwahara, K. Iwase, Y. Iwashita, Y. Yamamoto, M. Hitosugi) 91
18. Risk Prediction Technology using the Context of the Driving Environment
(T. Sugano, Y. Kuroda, T. Fushima, Y. Yamamoto, Y. Saito) 98
19. Prediction of Amount of Water Received for Vehicle by Using Splash Simulation
(S. Maruyama, A. Tsuchiya, T. Yoshida, T. Yamane, T. Kamioka, K. Ochiiwa) 105
20. Realization of No Processing Manufacture with Highly Accurate Die-cast
(D. Sasaki, M. Juri, A. Yamamoto, I. Kouno, S. Fujii, H. Oguni) 111
21. VOC Recovery Technology for Reduction of CO_2 and VOC Simultaneously
(Y. Kato, M. Shinoda, K. Teramoto) 117
22. Refinement and Optimization of Inspection Process Using AI
(T. Namatame, N. Horimoto, T. Otani, K. Iwanaga, Y. Nishino) 120
23. Development and Realization of System for Passing Down Skills and Techniques on Digital Motion Analysis
(C. Saeki, Y. Kubo, M. Suga, H. Egusa, A. Ohta) 127
24. Model-based Research and Development of Accelerated Evaluation Techniques for Corrosion Resistance of Painted Parts
(T. Asada, K. Sasaki, T. Ezaki, T. Shigenaga, A. Takami) 133
25. Technology of Visualization and Evaluation of Microscopic Fracture Behavior Inside Fiber Reinforced Plastic Composite Material for Implementation for MBD/MBR
(C. Kawamura, T. Takahashi, H. Sumida, T. Sugiyama, M. Ueda, S. Yoneyama, A. Todoroki, T. Miyanaga, K. Nishida, T. Yokozeki, R. Higuchi) 139
26. Research on Multiscale Analysis Technology that Connects Vehicle Functions and Material Properties
(K. Nishida, K. Himuro, C. Kawamura, M. Honda, S. Fujimoto) 144
27. Estimation of Air Charging Efficiency Using Gaussian Process
(F. Ogawa, K. Kuwahara, T. Hirano, M. Mera, M. Wada, K. Matsue) 150
28. Unified Expression of Spray Breakup Characteristics Using a Non-dimensional Quantity
(A. Kuramochi, Y. Harada, T. Nagasawa, M. Seto, H. Yamashita) 156
29. Study on Damping Performance for Granular Damper Using Fine Particles
(H. Sakai, K. Ichikawa, H. Kominato, K. Nakano, M. Sakaki, A. Takezawa, M. Kitamura) 162

List of Reports Published in 2020 169

巻頭言

変化に強靭なモノ造りに向けて

Robust Monotsukuri Against Changes in the Industry

常務執行役員　　小島　岳二
Takeji Kojima

今号でマツダ技報も 38 号となり，1983 年創刊以来継続できているのは，これまでの諸先輩方の今まで積み上げてきた努力と資産が連綿とつながってきた証と考える。マツダも 2020 年で創立 100 周年を迎え，既に新たな 100 年に向け踏み出している。先人への感謝と共に，我々の理想や夢の実現に向け，モノ造りのクリエイティビティをモチベーションとして，変革の努力を続けて行きたいと考えている。

一方で，自動車産業は 100 年に一度の変化に直面し，我々はその大きな変化への対応が必要な状況にある。各国政府は 2050～2060 年でのカーボンニュートラル化を宣言し，自動車は Well-to-Wheel での走行段階や燃料製造段階の CO_2 排出量をゼロにするだけでなく，LCA（Life Cycle Assessment）による製造や輸送も含めた CO_2 排出量をゼロにすることが求められている。この CO_2 削減に貢献する電動化の加速も待ったなしであり，各国の温室効果ガス削減に向けて，環境規制の強化も加速度的に高まり，2025 年や 2035 年までに内燃機関のみの車両の販売を禁止する政策を掲げる国々も増加している。この電動化に加え，自動車に新しい価値を生み出す自動運転，コネクティビティ，MaaS を含めた CASE 技術への対応，技術の確保も遅れが許されない。加えて，IT 企業や新興勢力の自動車産業への参入により，顧客への新たな価値提供，モノ造りのスピードなど，今までの自動車産業の「あたりまえ」の考え方を破壊しており，これらの動きにどのように対峙していくかで，企業としての生き残りがかかってくると考える。

さらに，2019 年末から広がった感染症により，人々の行動は制限され，生活に大きな変化をもたらした。自動車産業にとっても，サプライチェーンの分断による部品供給課題から，同時にサプライチェーンの強靭化も求められてくる。

マツダのような自動車産業の中で比較的規模の小さなスモールプレイヤーにとっては，大きな変化の渦に飲み込まれず，我々の理想や夢を大事にしながら，将来の変化に柔軟に対応できるモノ造りが求められている。

その対応について正解は無いが，5 つの視点での取り組みが重要と考えている。

1 点目は，モノ造りにおける他との区別化，生き残るために独自性を保ち，自分たちが守り続ける**「お客様に感じて頂きたい価値の先鋭化」**である。昨今，EV や自動運転技術を市場導入することを目的化する論評を多く見るが，技術は目的を実現するための手段であり，何のためにその技術を使うのかといった目的が重視されるべきである。マツダでは，コーポレートビジョンやサステナブル Zoom-Zoom 宣言 2030 に示されるように，「カーライフを通じて人生の輝きを提供」，「クルマの持つ価値により人々の心を元気にする」を

掲げており，2012 年の新世代商品である CX-5 導入以降，ドライビングポジションやペダルレイアウト等，「人間中心」の開発哲学に基づき技術を進化させ続けている。現在では，メディアなどの外部のステークホルダーの皆様からもマツダ車の価値として認めていただいていると認識しており，更に進化させるべき価値と考えている。

2 点目は，**「将来予測と対応戦略の共有化」**である。将来予測は，不確実なもので，時として自分たちにとって不都合な将来が予測されることもある。それらを正しく認識したうえで，正しく解釈し，受け止め，1 点目で示した「独自の価値」を守りながら，どのように対峙していくのか，自分たちなりの中長期の戦略が必要である。その戦略に基づき人・モノ・金のリソースを準備していく。加えて，その戦略の目的・意図を開発メンバー全員に理解・浸透させ，進むべき方向性を一致させることが開発の原動力になると考える。

3 点目は，戦略実行に向けた，**「資産の活用」**である。スモールプレイヤーとして限られたリソースでは一足飛びに理想とする技術を手にすることが出来ないことが多い。理想という城を築城するために，その土台となるブロックを完成させ，それをひとつひとつ積み上げていく。さらにその資産を活かし，次なる進化のブロックを継続的に積み上げる，マツダならではの技術革新とプロセス革新の考え方と言える。電動化技術や安全技術の進化，MBD/MBR（Model Based Development/Model Based Research）の進化，モノ造り革新の進化など，いままでの資産を活用して技術革新を遂げてきた実績であり，これらの自分たちが獲得した資産を理解し，活用することが必須である。

4 点目は，**「協業」**である。特に，CASE 技術の獲得など，今までの社内資産の活用で対応できない新領域や新技術の獲得には，外部との協業が欠かせない。自動車業界のみならず業界を超えた協業が必要である。マツダは過去から志を同じくする皆様と協業を進めて来ているが，必要な取り組み姿勢は，「共に学び，共に汗をかき，Win-Win な関係を築く」ことである。これは必ず忘れてはならない。

日頃からマツダを支えて頂いている地場のサプライヤー様や地元の企業や自治体の皆様も「協業仲間」であり，この姿勢を守りながら，より一層高いハードルであるカーボンニュートラル化への取り組みは，地域が一緒になって進めて行きたいと考える。

5 点目は，**「発想の転換」**である。先の読めない将来の変化の中，今後も多くの要求・要請に対峙することになる。特にカーボンニュートラル化は，サプライチェーンを含めた LCA での CO_2 削減と経済成長を両立させなければ達成できないハードルであり，考え方や取り組みにブレークスルーが必要である。より高いハードルに挑戦していくために，視点や視野を広げると共に，発想や意識を変え，「やらなければいけない」という負の側面を，「理想を実現する」という正のスパイラルに転換させ，前向きに課題に対峙していく思考が必要と考える。

最後に，今号に寄稿された皆様に深く感謝したい。今号では，マツダの新しいページを開く，マツダ初の量産 EV である MX-30 を特集する。MX-30 は，MAZDA3，CX-30 から始まったマルチソリューションプラットホームのスモール車種群の集大成にあたり，人間中心の考え方を極めると共に，多くのコト創りにも挑戦している。当技報でその内容を理解し，是非とも実車でその価値を体感頂きたい。

特集：MAZDA MX-30

01

MX-30 のデザイン
Design of MX-30

松田　陽一 *1
Youichi Matsuda

要　約

クルマに縛られずに新しい価値を創造する。これがプログラムチームに課されたミッションである。環境や社会貢献意識の高まり，IT がもたらすライフスタイルの変化やグローバル化等，CASE の定義にかかわらず人々の生活に大きな変化が起きていることは周知のことである。この時代を前向きに生きていく人々とマツダは手を結びたい。そんなチャレンジングなクルマをこのパワートレインの変化を好機としてリアルなプロダクトとして生み出す。MX-30 誕生の全ての起点がここであった。

Abstract

“Creating new values irrespective of vehicles” - this is the mission given to the program team. We should pay attention not only to technology development for CASE but also to the significant changes in people’s lives such as growing awareness of environment and social contributions and IT-brought innovations in life style and globalization. Mazda seeks to join hands with those who are positive and determined to go about their everyday lives in the times. We have materialized our challenges as a vehicle by utilizing the change of powertrain as a good opportunity. Here was the origin of all the aspects of MX-30.

Key words : Vehicle development, Design, Exterior/Interior, Color, Kodo, Sustainable, Cork, Electrification

1. はじめに

MX-30 の開発では初期に，想定されるターゲットカスタマーの心根を感じ取りにいく活動が実施された。シリコンバレーで起業間もない若者たち，新進のデザイナー，高度なスキルを身に着けスペシャリストとしての生き方を模索する人達，まだチャレンジャーである彼らがこれからの未来の何に価値を見出し，何を志しているのかを，主査，プランナー，マーケッター，エンジニア，そしてデザイナーでチームを組み，彼らの職場や自宅でインタビューを行った。このような広範囲のメンバーによる密度の高いチーム活動を，開発初期からの商品導入コミュニケーション立案まで継続したのは稀なケースである。この活動がコンセプトの軸となり，困難を乗り越えるための基礎となった。結果，チームは「私らしく生きる」という極めてシンプルな答えに辿り付く。彼らはミニマリスティックに好きなモノに囲まれ，好奇心や能力を生かし，利他的に貢献することにモチベーションを感じていた。祖母から受け継いだ家具を愛用し，古い工場をリノベーションした職場で働く等，先端を生きる人達のイメージであるアーリーアダプターとは違う側面が見えてきた。ターゲットカスタマーとの議論の中で，マツダが示したイメージビジュアルの中の未来的なイメージに対して，「あなた（デザイナー）の描いた未来は半年後も未来ですか？」というコメントが寄せられた。演出されただけの未来は訪れないかもしれない。だとしたらそれは直ぐに価値を失うということである。このことは時として自己表現の一面を担い常に変化を生み出さなければいけないとされるデザイン開発視点からすると，海図のない航海に乗り出せというような示唆であった。

2. デザインコンセプト

2.1　ブランド進化の中で

マツダデザインは「魂動」の哲学の下，フェイズ 1 商品を群として構築してきた。一括開発による商品力の底上げと，何よりマツダのブランドの認知を高めるためである。その成果は確実に表れ，各国でのさまざまな賞の受賞や，カスタマーからの高い評価をいただいている。そして新型 MAZDA3 から始まるフェイズ 2 の商品から，表現の幅を広げることを進化の一つの道筋にしている。

*1　デザイン本部
Design Div.

その中で MX-30 のポジションは，スモールプラットフォームによる電動化のリーディングモデルである。ビジネスピラーモデルの進化が示される中，既存カーネームに縛られないデザイン表現の可能性を模索することで，今後のブランドの広がりのヒントを生み出すことが開発当初から期待された（Fig. 1）。

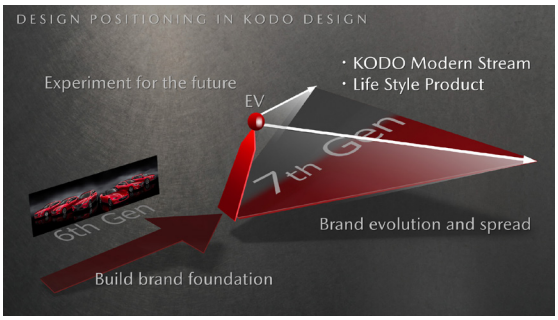


Fig. 1　Design Positionng in KODO DESIGN

3. エクステリアデザイン

3.1　マツダらしさと新しさの実現

魂動デザインでは，クルマに生命観を与え，見る人の感情に訴えかけることに重点を置き，より要素を研ぎ澄ましながら深化を進めている。これは要素を省いていくことが目的ではなく，研ぎ澄ますことでアートのように見る人の心に深く印象付けることを目的としている。MX-30 がマツダのブランドの一員である以上ここは変わらぬ探求すべきポイントである（Fig. 2）。

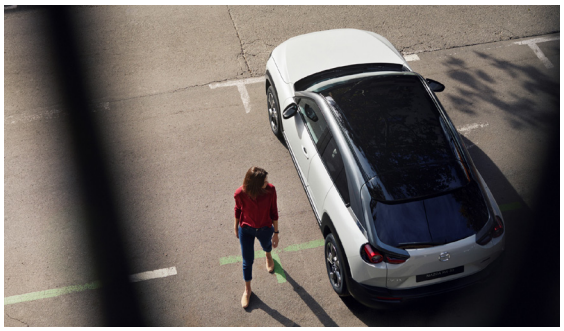


Fig. 2　Exterior Production Image 1

基本立体は，ウエッジシェイプを抑制しキャラクターを廃したサイドビューでスタティックな印象をねらっている。そこにフロントエンドと A ピラートップに塊と力点を置きながら後方に勢いを抜くことで，強い塊の中に動きと軽やかさを両立させている。更にボディー平面視をダイナミックなバレルシェイプ（樽型）とし，前後の絞り込まれた部分にしっかりとタイヤがトラクションを感じるように踏ん張るデザインを基本構成としている。このことでシンプルな塊感の中にスタビリティーや躍動感を 2 次的に感じることになる。またベルトラインとショルダーをクルマの前後を貫き通す背骨ととらえ，そこを起点にボディーの中心軸に対して収斂していくようなサーフェイス構成とし立体に意思を持たせるようにまとめ上げている。つまりフィーチャーといえるメッセージは省きながら，造形の基本骨格で強い生命観を感じる要素はもれなく織り込んでいるのが MX-30 の立体である（Fig. 3）。

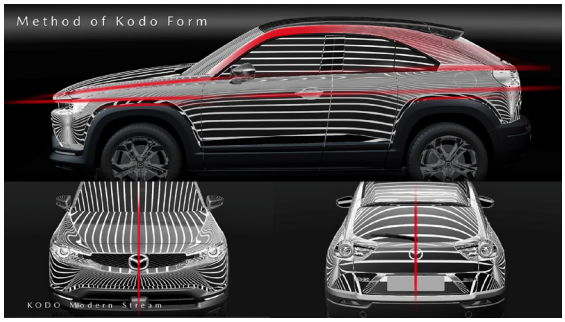


Fig. 3　Method of KODO Form

エクステリアのパーツ類ではマツダらしさの表現として，ランプ周りの丸をモチーフにしたミニマルなマシン感と瞳感があり，また彫りの深いグリルによる意思を感じる表情を意識して作り込むことにより，生命観が基礎としてある立体造形と合わせてシンプルさの奥に人格を感じさせるようなキャラクター実現している（Fig. 4）。

Fig. 4　Mazda-ness Details

3.2　フリースタイルドアとシルエット

電動化のリーディングモデルとして，Mild HEV から BEV，ロータリー搭載と幅広くパワートレインをプロテクトする車両デザインのハードポイントとして最も大きな存在となるのはバッテリーである。最低地上高を確保した上でバッテリーを敷き詰め，その上にキャビンを構成するとサイドビューの厚く重いイメージが付きまとう。特にシルエットの中でキャビンの存在感は鍵となる。その中でも居住空間と乗降性は人に依るもので大きく変えられない。開発の途中シルエットの重苦しさは常に課題として付きまとっていた。またプランナーも新しい価値を創造するミッションに対し，既成概念にとらわれない創造的な使い方について，機能的提案に限界を感じる状況が続いていた。そのような中，チーム内に展開されたメールに張られたリンクが話題となった。それは RX-8 のフリースタイルドア（以下 FSD）を下肢の不自由なオー

ナーの方が使われている動画であった。FSD にはもっとさまざまな可能性があることに気づかされた。また社内にも RX-8 での FSD 経験者が居ることも参考となった。子供が小さい時に後席ベビーシートに乗降させる際に体の負担が少ないこと，顔を見ながらの所作によるコミュニケーション等，リアルなフィードバックが次々と寄せられた。結果これを使わない手はないという結論に達した。

Fig. 5　Free Style Door and Egress/Egress

同時にデザイナーとエンジニアによるパッケージ検証が行われた。サイドビューはリア席の乗降ラインから DLO（Day Light Opening）ラインの自由度が高まることがすぐ分かり，サイドビューの再構築にかかった。RX-8 でも 4 人乗りのスポーツカーを作るソリューションとして採用されたものなので印象は一気に軽くなった。しかしドアを支えるストライカー＆ラッチ部分は最新の安全要件を想定し前席乗員の頭上空間を確保しようとすると折り合いが付かないばかりか，単純に要件を織り込むとサイドウィンドウタンブルを垂直に立てることになり，正面視及びクォータービューでのキャビンバランスが悪くなる課題に直面した。機能レイアウトや構造図面を睨みながら，キャビンボリュームをエンジニアと何度となくやり取りを行いキーとなるドアストライカー位置をミリ単位で見出していった。量産ステージに移行後も，ドア強度と視界の両立を始めとしたリアルワールドでの性能を満たすための検討が続いた。更に FSD としての使い勝手を高めるために，ドアヒンジの新設によるドア開度の拡大にまで踏み込み，デザイン修正を伴う作りこみは開発終盤まで徹底的に行われた（Fig. 5）。

Fig. 6　Exterior Production Image

3.3　フレームドトップ（3 トーン塗装）

パッケージ上キャビンをもっと軽く見せたいという思いは，FSD は元より外板色にも及んでいる。デザイナーはこの思いからスケッチの中でクラッディング（黒色のシボパーツ部）の表現に合わせてキャビンを 2 トーンに描いていった。同時にプロポーションの中で FSD によるルーフサイドの特徴を個性として訴求するアイディアに発展していく。開発呼称「フレームドトップ」と名付けた，ルーフセンターを黒落しにし，逆に流麗なルーフサイドをメタリックで際立たせる 3 トーン塗装の提案である。多重塗装は近年のマツダの工場では設備がなくデザインからの提案も憚られる案件でもあった。関係者の協力を得るため，色表現の発展性含めた魅力を積極的に伝えることで，ビジネス性確認も含め共感を引き出し，実現可能な手段へと落とし込んでいった。その中での検討は，量産工程でのサブラインの確保，フィルム化の検証，マスキングを想定したデザイン構成の変更等，検討項目は双方向的に多岐にわたっている（Fig. 7）。

Fig. 7　Framed Top Cabin

3.4　ホイール及び空力デザイン

電動化をリードするクルマとして期待されるエアロダイナミクスはスモールプラットフォーム群での検討を生かし，空気抵抗はもちろん，ハンドリングや風騒音も高いレベルでデザインに反映している。その中でもアルミホイールは，クラッディングのシャープな工業デザイン的処理になじむような造形とし，平板になりがちな空力対応に対して，二つのホイールがレイヤーで重なったようなモチーフとして立体感と軽快さを確保している。このアルミホイールを代表としてその他の空力処理も強くそれを主張しないようにしている（Fig. 8）。

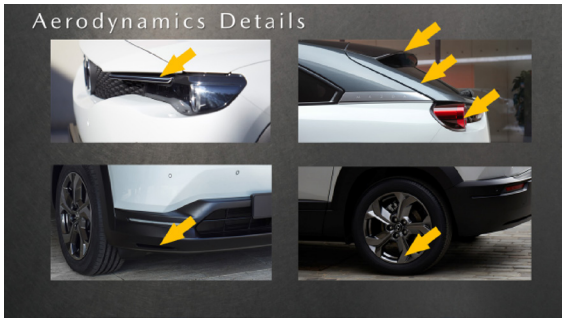


Fig. 8　Aerodynamics Details

4. インテリアデザイン

4.1　開放感に包まれて調律される空間

クルマに乗る行為は運転を楽しむ以外の価値もチームで議論している。その中で運転中に心訪れる調律が極めて重要ではないかという議論を行った。一人または大事な人と占有できる空間として，運転に集中できている時にふと自身を俯瞰している開放的瞬間等，A 地点から B 地点への移動は単に時間を費やしているように見えて，他では得難い極めて価値ある時間になり得ていることに注目した。この体験をクルマ好き以外の方にも伝わるよう最大化していこうという試みでインテリアのコンセプトとデザインを組み立てている（Fig. 9）。

Fig. 9　Embracing Interior Sparse

4.2　心と科学をデザインでつなげる

マツダには「人間中心」というモノづくりの基礎がある。足を延ばした先に自然にあるペダルレイアウト，骨盤を立てることにこだわったシート設計，視線移動の少ない機能表示等，人間本来の特性に目を向けた開発による，安心と安全があっての運転の楽しさは変わらず MX-30 にも展開されている。更にそこにドアを開けた瞬間から始まる心の視点をチームは加えることに挑戦した。デザイナーは直感的にターゲットカスタマーをイメージしながら，心が調律されるような空間のビジュアルを描き出していく。更にそれらを評価＆ブラッシュアップしイメージを高め，空間の連続性，シンプルな造形エレメント，素材の心地よさのポイントを見出した。また，技術研究所が同じような視点で空間の連続性検証をしており，その知見も有効活用した。ポイントは左右の空間のつながりにより運転手と助手席の人との共感値が上がることがデータで示すことが出来るものであり，このフィードバックを受けデザインのクレーモデルを使い左右座席の連続感やシフトパネル下の開口等の空間のプロポーションを一気に固めていった。この際作業には紙や発泡材等を駆使し，現実空間で短期での確かな検証とした（Fig. 10，11）。

Fig. 10　Experimental Verifications

Fig. 11　Interior Floating Theme

4.3　インテリアパーツデザイン

機能部品に最先端のデザインを印象付けるには，ハイテクな表現をするのが常套手段であるが，この点でもチームでのブレインストーミングと議論が繰り返された。本音で自分が求める新しさの深掘りである。その中で，実生活では購入意欲がわくポイントは，ハイテク 3 割，親しみやすさ 7 割のイメージのプロダクトであることが見えてきた。新しいことでのベネフィットやワクワク感があり，記憶の奥底にある安心感や親しみも必要という度合いである。この視点をベースに，メーター，シフト，シート等の空間に置かれるエレメントは個々の造形を研ぎ澄ますが，それらを必要以上にインテグレートせず，直感的に機能が想起できる愉しさや安心感でまとめ上げている。

例えば，シートは人が直接触れる部分をファブリックとしてその周辺を人工皮革のシェルで支えるイメージで構成しており，座り心地が一目で分かるデザインとしている。またリアシートは同じ素材構成イメージとしながら，フリースタイルドアによるサイドトリムもシートの一部として取り込み，サラウンドしたラウンジソファーをイメージしたシートとして，単なる座席ではなくオーナーの創造的なプライベート空間として活用するイメージも想定している。この発想には，初代 FF ファミリアやペルソナ，コスモ等のリア席空間をヒントとしている（Fig. 12）。

Fig. 12　Interior and Seats Production Image

また新投入の部位へは，単なる演出ではなく前述の心とデザインを科学で検証する開発を展開し，ロアディスプレーの空調コントロールやインタラクション画面，新しいパターンのエレキシフト等は，実験／設計と機能性の造り込みとデザインの共創を行い，量産形状を実現している。

5. カラーデザイン

5.1　素材でテーマをリード

今回コンセプト面からも注力したのがインテリア素材の革新である。クルマの内装は基本さまざまな表面加工された樹脂系で構成された空間に，ファブリック系や革，金属，時として木材があるというのが定石である。更に，プロセス上どうしても，パッケージ～形状～素材の順番に開発がスタートしフィックスしていく，この素材による体験やプロセスを大きく変えることを目指した。ターゲットカスタマーには環境対応や素材のもつキャラクターがデザインの一部として認識されることは確信していた。先行開発段階からスタートした素材開発は，心に優しい素材感があり環境対応の配慮も含めた素材の物語があるという視点で検討をしている。具体的には揺らぎを感じる表情や触感による自由さと，素材自体の物語も含めた今を生き抜く賢さのイメージが感じ取れることである。

5.2　呼吸感素材＆ PET リサイクル繊維

ドアトリムには PET からのリサイクル繊維によるフェルト状の表面を用いている。不均質で揺らぎを感じるこの質感を最も広い壁の基本質感とすることで，空間の基礎としての空気を含んだ温かみのイメージを実現している。テーマ開発時は和紙の採用も視野に入れ，石州和紙の工房で紙漉きの挑戦も行い，そこでの試作を理想の素材感のターゲットとして設定している。また PET のリサイクル繊維はデニム調の黒ファブリックにも質感と風合いを考慮し約 20%の割合で採用した。これらにより，クルマへの内装材へのリサイクル材採用の可能性を示している。

5.3　プレミアムヴィンテージレザレット

素材の価格によるヒエラルキーは現在の内装開発に付きまとっているが，それがカスタマー体験の価値のレベルと一致しているわけではない。また現在の技術レベル向上により，人工皮革の質感が飛躍的に向上，生産工程での有機溶剤を使用しない製品も提案されている。今回この人工皮革をブラウンのレザー部に採用している。プリント加工を採用し，質感をあえてムラ感による揺らぎを感じるヴィンテージ調がマスプロダクトレベルで採用できているのも，人工ならではの技術である。また触感に関しても本革と近いレベルを実現している（Fig. 13）。

Fig. 13　Sustainable Materials

5.4　ヘリテージコルク

センターコンソールとドアグリップに採用したコルク素材は，一部社史を想起する関係者は居たものの，提案自体は若手カラーリストからコンセプトを想定した素材案として親しみやすさや風合いの視点から提案されたものであった。しかしコルクは現在雑貨的で身近すぎる素材であり，高額商品のクルマに使う発想にネガティブな印象をもつ関係者も多かったことも事実であり，開発は当初細々と進められた。

コルク製品の実績のあるメーカーとして，クルマ部品のノウハウがあり，既にマツダと取引があるメーカーの一つが岡山県の内山工業(株)様であった。現在その主力商品はシールガスケット等であり，クルマには欠かせないエンジン部品をマツダへも供給いただいている。また食品向けのコルク栓やステーショナリー等コルク製品も網羅的に扱われている。一見コルクと自動車部品は何の関連もないようだが，開発を通して自動車産業の歴史のつながりがあることを知った。シール材，更に断熱や衝撃材の原点がコルクであり，合成ゴムやスチロール樹脂が戦後に発達するまではその役割を担う素材はコルクであったという歴史がそこにあった。そしてマツダがコルク事業のバトンを渡したのも内山工業(株)様であった。コルクの歴史が示すように，素材自体は木材としてはエンジン部品に使われるほどのタフな素材である。クッション性も含め極めて機能的な素材である良さを生かし切るコンセプトが提案された。使用する部位はルールとしてトレイとグリップに限られている。しかしデコレーションパネルにしないというこだわりが，機能性能を付加する必要が出てくるため，開発のハードルを一段上げてしまうことになる。同時にインテリア部品は見栄え品質がシビアな部位でもあることは変わりない。両立を実現できたポイントとして，コルク表面強度を実現するための基材との同時貼合技術や食品向けコルク素材の脱臭加工等の内山工業(株)様の知見，次に天然素材の劣化対応を以前から本杢パネルを採用していたマツダ側の知見を生かし，幾つもの試行錯誤を経て製品化を実現している。そしてコルク製品は伐採ではなく樹皮の採取で確保する素材であり，成長過程で CO2 を吸収し続け，MX-30 の部品を始めとしたコルクチップによる製品はワイン栓

を抜き出した後の破材を利用するという極めてサステイナブルな素材であることも重要なポイントである。最終的には製品化を実現できる手段と，車両コンセプトとの親和性，そして歴史が量産化への理解の力となっている（Fig. 14）。

Fig. 14　Heritage Cork

5.5　カラーコーディネイト

インテリアコーディネイトには，Modern Confidence と Industrial Clasic のモダーンをテーマにした 2 つのインテリアを設定し，グレードのヒエラルキーではない嗜好による選択としている（Fig. 15）。

Fig. 15　Interior Color Lineup

このインテリアにコンビネーションとなるエクステリアカラーは，3 つの全述のフレームドトップと 4 色のモノトーンを設定。これらの組み合わせによりさまざまなターゲットカスタマーのスタイルに寄り添えるコーディネイトを生み出せるよう想定している。フレームドトップのルーフサイド色には，セラミックとソールレッド向けに，暗めのダークメタリック，ポリメタル向けに明るめのシルバーメタリックの専用開発の 2 色で対応し，基本ボディー色に対する明度差に対して丁寧なマッチングのコントロールを行っている。前述のように多重塗装の提案は行っているが，基本ボディー色での新色の設定は今回行っていない，色の組み合わせによる多様性と発展性が最大の提案である（Fig. 16）。

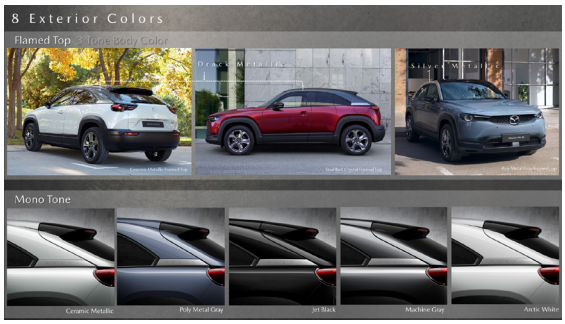


Fig. 16　Exterior Color Lineup

6. おわりに

企業が 100 年続くというのは稀なことで，その節目に新しい価値や技術のプロダクトに関わることができるのは更に稀なことである。大げさかもしれないが歴史の大事な瞬間に私たちが関わることができたことを幸せに思う。そしてそのプロダクトが，それを手にしたお客様の生活や人生に変化をもたらすであろうことに想像力を膨らませることは楽しいことである。この想像力を次の 100 年につないでいきたい（Fig. 16）。

Fig. 17　With MX-5. “MX” Challenge

■著　者■

松田 陽一

特集：MAZDA MX-30

02

MX-30 の紹介
Introduction of MX-30

竹内　都美子 *1　上藤　和佳子 *2　岡田　譲太 *3
Tomiko Takeuchi　Wakako Uefuji　Jota Okada
岩永　未央 *4　信本　昇二 *5
Mio Iwanaga　Shoji Nobumoto

要　約

MX-30 は，これまでの常識にとらわれることなく，新しい価値の創造に挑戦し，人とクルマの新しい関係を提案したモデルであり，同時にマツダの電動化戦略のリードも担っている。お客さま自身が自由な発想でクルマの多彩な楽しみ方を創造し，より自分らしく過ごせる空間の提供を実現した，MX-30 の商品コンセプトや特徴を紹介する。

Abstract

MX-30 is an unconventional model challenging to create new value and proposing new relationship between car and human. At the same time, plays a leading role for Mazda's electrification strategy. We are presenting here the concept and unique features of MX-30 that realizes space and atmosphere for customers to spend their times being true to themselves by enabling them to create various ways with free thinking to enjoy the car.

Key words : Vehicle development, BEV, Design, Vehicle dynamics, Freestyle door, Sustainable material

1. はじめに

私たちの生活は多くの情報や日々進化する技術に囲まれ，ますます便利で快適になっている。その一方，情報の多さや時間に追われる生活の中で，情報と距離を置き，もっと自然体で自分らしく生きたいと思う人が増えている。また，直接的な人と人との触れあいが少なくなる中で，人と人がともに過ごす時間がより大切になっている。私たちはクルマがお客様にとって身近な存在だからこそ，ともに過ごす時間をより人間らしく，心豊かな時間にするために MX-30 がどうあるべきか，お客様が大切にされている想いや空間，モノと向き合うことから始めた。そして，お客様が MX-30 に触れ，乗り込むと「心がととのえられる空間」であることを目指した。

また，マツダは，Well-to-Wheel 視点で，各地域の自動車のパワーソースの適性やエネルギー事情，電力の発電構成などを踏まえ，適材適所の対応を可能とする，マルチソリューションが必要と考え，2030 年に生産する全ての車に電動化技術を搭載することを公表している。MX-30 はこのマツダの電動化戦略をリードする重要なモデルとして，マイルドハイブリッド車（MHEV）とマツダ初の量産電気自動車（BEV）を導入した。「MX-30 EV MODEL」に搭載するバッテリーは，Life Cycle Assessment（LCA）評価による CO_2 排出量を抑えることと，買い物や通勤など，日常生活でのお客様の実用的な使用環境に見合った走行距離を考慮し，総電力量 35.5kWh とした。

2. 商品コンセプト

商品コンセプトとして，気軽に毎日乗りたくなる，開放的な空間に心も自由になって，自然体の自分でいられる，自分らしい人生を進めるように，パートナーとして傍らで支えるような商品を目指した。これを実現するために，以下の 4 つの Key value（KV）を定義した。

KV#1　魂動デザインのコアである美しさに，親しみやすさや頼りがいの拡がりにチャレンジしたデザインコンセプト「Human Modern」
KV#2　細部にわたる造り込みと環境に配慮した素材によって，心がととのう室内空間
KV#3　純粋な楽しさをもたらす，ドライビング体験
KV#4　安心して運転を楽しめるように，進化した安全性能

*1〜4　商品本部
Product Div.
*5　車両開発推進部
Vehicle Development Promotion Dept.

3. 商品特徴

3.1　KV#1　デザイン

マツダのデザインテーマ「魂動（こどう）-SOUL of MOTION」は，2019 年の MAZDA3 からフェーズ 2 として新たなステージへと踏み出した。「Car as Art」というテーマの下，更に芸術性を高めるとともに，表現に拡がりを持たせることにチャレンジしている。MX-30 では，これまでと変わらぬ人の手が生み出す美しいカタチとこだわりのつくり込みを基礎としながら，これから始まろうとしている価値観の変化や，新しい生き方に寄り添った表現の方向性を模索した。そうして生まれたのが，MX-30 のデザインである。「Human Modern」をデザインコンセプトに，大胆な塊そのものがもつ美しさを際立たせるため，シンプルな立体構成に徹したエクステリア，後述するフリースタイルドアによる身軽さを体現したキャビンデザイン，親しみやすい表情，抜けのよい立体構成により「開放感に包まれる」インテリア空間，サステナビリティをテーマとした個性的な素材使い等，いままでにない新しいアプローチにより，魂動デザインの方向性を体現した。クルマの既成概念にとらわれない，使う人の発想による創造的なライフスタイルを実現できる。

また，クーペライクなキャビンとフリースタイルドアをクリアに表現するために，キャブサイド（A ピラーから D ピラー）の一部とリアゲートサイド部にメタリックカラーによる開発呼称フレームドトップの 3 トーンカラーを開発している。

（1）フリースタイルドア

この車の最大の特長のひとつが，センターオープン式のドア構造を実現したフリースタイルドアである（Fig. 1）。

Fig. 1　Freestyle Door

専用設計のヒンジの採用により，フロントドア 82°，リアドア 80°という，ほぼ垂直に近い角度まで開く前後ドアを実現した。またセンターオープン式としたことで，移動することなく前後ドアの開閉操作を行うことができる。なお，ドア開時はフロントドア→リアドアの順に，ドア閉時はリアドア→フロントドアの順に操作する構造としている。フロントドアの開度は，大きな荷物の扱いや，ベビーカーや車いすでのアクセス性までをも考えて設定している。例えばベビーカーを使用する場合，前後ドアを開いたその間のスペースで乗せ降ろしの準備が可能。そしてセンターピラーがないため，子どもの顔を見ながら楽な姿勢でスムーズに乗せ降ろしすることもできる。また乗降性の良さを実現するため，開口部の高さや造形，サイドシルの断面やサイドシルガーニッシュの形状などは，人間特性に基づいて綿密に設計。センターオープン式の開閉構造と合わせて，自然な姿勢でスムーズに乗り降りできるように造り込んだ。またリアドアトリムには縦型グリップを採用。開閉操作時に力を入れやすく，またドア全開時にも手首に大きな負担をかけることなくつかめる構造としている。マニュアル調整式のフロントシートには，ワンタッチでシートバックが前に倒れると同時に前方へスライドするウォークイン機構を搭載した。

3.2　KV#2　心がととのう室内空間

MX-30 では心の領域まで踏み込んだ価値に挑戦した。乗る人に安心感を与え，気持ちをリフレッシュさせ，心をととのえる。これは，自分らしく自由に創造的なライフスタイルを送る後押しになる。乗り込んだ瞬間から，運転し，クルマを降りる瞬間まで，全てのシーンにおいて乗る人にとって自然体でいられるよう，空間や素材，最新の心と体の研究に基づく機能を融合させて室内空間を造りこんだ。

（1）フローティングコンソール（空間）

マツダならではの人間特性に基づいた造り込みによって運転に集中できる環境を支えるとともに，開放感にあふれる居心地のよさと使い勝手のよさを提供した。

人間特性の考えに基づき，シフトレバーとコマンダーコントロールを前方に配置し，センターアームレストの高さも確保した。これにより，アームレストに肘を置きながら，自然な腕の角度で各デバイスを操作できるようにしている。センターアームレストのクッション部には前後スライド機構を採用。乗員の体格を問わず，誰もが安楽な姿勢を取れるように造り込んだ。

コンソール前方下側の吹き抜け構造部は，前席乗員同士の強いつながり感を創出するとともに，収納スペースとしても活用できる。MX-30 の最大の特徴のひとつとして，すっきりとした抜け感の表現と機能性を高次元に両立した。

（2）後席デザイン（空間）

開放感に包まれる新しい感覚を生むために，サラウンドしたラウンジソファのような後席デザインを採用した。後席乗員が着座した姿勢から，自然に外の景色が見える位置にリアドアガラスとクォーターウインドーを配置し，居心地の良さを提供している。

（3）Sustainable Material（素材）

「ヘリテージコルク」と呼ぶ自動車としては新しいコルク素材を，コンソールトレイとドアグリップ部に採用した。コルクは環境負荷の少ない素材である上に，温もり感のある見た目・手触りは乗る人に安心感を与え，そのクッション性は機能性にも優れている。コルクならではの素材本来の特徴を活かす専用コーティング，コルク材と樹脂を同時に成型する手法を開発したことにより，コルクらしい風合いを最大限に表現しつつ自動車部品としての高い耐久性を両立した。従来の内装素材と同等の性能を確保している。「ヘリテージ」の由来は，マツダの歴史が，1920 年に「東洋コルク工業(株)」として設立したことから来ている（Fig. 2）。

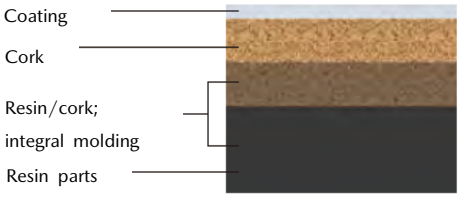


Fig. 2　Heritage Cork

その他にも，ペットボトルのリサイクル原料から作られた繊維素材をドアトリムアッパー部に，リサイクル糸を使用したファブリックを一部シートに採用しており，環境負荷の少ないサステイナブルな素材を用いて，心地よい空間を構成している。

プレミアムヴィンテージレザレット（人工皮革）を開発し，人工皮革という技術だからこそできる触感と表情の表現の可能性にチャレンジした。高品質な人工皮革をベースに，豊かな表情を見せるヴィンテージレザー柄をプリントし，皮膜の厚さを緻密にコントロールしたシリコンコートを施すことで，奥行き感のある表情と心地よい手触りを実現した。またこの人工皮革は生産プロセスの中で有機溶剤を使用しないため，環境負荷の低減にも貢献している。

（4）タッチパネルディスプレー（機能）

MX-30 はフローティングコンソール前部に，7 インチのタッチパネルディスプレーを採用した。このディスプレーは，インタラクション機能と，直観的なタッチ操作が可能なエアコン機能の 2 つの役割をもつ。インタラクション機能は，「心」の領域に踏み込んだマツダのチャレンジである。クルマに乗り込むたびに少しずつ違うグラフィックがドライバーを迎え，人とクルマとの心理的距離を近づける体験を提供する。

（5）エレキシフト（機能）

安全性を最優先させるマツダの思想に基づき，確実な操作をサポートする新しいシフトパターンを開発した。エレキシフトのシフトレバーはスイッチ式やダイヤル式などさまざまな方式があるが，マツダでは従来の AT シフターと同様，各シフトポジションに応じてレバー位置が固定されるステーショナリー式を採用した。操作時の手応えと，瞬間的な視認でも現在のシフト位置がわかり，車両の状態を把握しやすいことを大切にした。

また，エレキシフトはシフトレバーとトランスミッションをつなぐケーブル類が不要となるため，フローティングコンソールの構造実現に大きく貢献した。

3.3　KV#3　ドライビング体験

「どんなシーンであっても，純粋に運転を楽しんでもらいたい」，そのマツダの想いは，パワートレインの種類を選ぶことなく，その車のもつ特徴を活かして，マツダで理想とする走る歓びを目指している。

MHEV では，人間特性に基づいた造り込みによって，従来モデルと同等の出足の良さや加速感を実現，手足のように動かせる車，人の運転操作原理と車の反応・挙動が一致することを目指し，街乗りから高速道路まで軽快で安心感のある走りを提供している。

BEV には，電動化技術「e-SKYACTIV」を導入した。人間特性に基づいた造り込みによって，マツダならではの思いのままに操れる走行性能とシームレスで滑らかな挙動を高次元に融合させ，SKYACTIV-VEHICLE ARCHITECTURE や G- ベクタリングコントロール（GVC）などの進化と合わせて，マツダの走行性能を更に深化させた。

（1）電動化技術 e-SKYACTIV

電動化技術での人馬一体の実現を目指し，「e-SKYACTIV」開発を進めてきた。e-SKYACTIV は，リチウムイオンバッテリーとモーターのシステムを基本とした，電力のみでの走行が可能な EV を実現する新開発の電動化技術である。そこに，マツダならではの人間中心の思想に基づいた技術を融合させることで，ドライバーの思いのままにクルマを操れるドライビングフィールを実現した。

（2）SKYACTIV-VEHICLE ARCHITECTURE

車両構造技術 SKYACTIV-VEHICLE ARCHITECTURE を，MX-30 でも取り入れている。SKYACTIV-VEHICLE ARCHITECTURE とは，自らの足で走っているかのような自然な感覚を実現し，乗る人全てが心地よさを感じられる走行性能や，無意識に体のバランスを取り，頭の揺れを抑えるという人間のバランス保持能力を，クルマに乗っているときでも発揮できることを目指して，生み出した車両構造技術である。その上で，EV の特長を活かす最適な造り込みを施すことで，人間の感覚にフィットした乗り心地と操縦安定性を実現した。

MX-30 BEV では，バッテリーパックを挟み込むように上下にストレートなクロスメンバーを配置するなど，バッテリーパックも環状構造の一部として活用し，路面入力のフロントからリアへの伝達遅れの低減に貢献している。

(3) エレクトリック G-ベクタリング コントロール プラス (e-GVC Plus)

MX-30 BEV では，高い操縦安定性を実現するマツダ独自の G- ベクタリング コントロールプラス（GVC Plus）を進化させた，エレクトリック G- ベクタリング コントロール プラス（e-GVC Plus）を搭載した。モーターのトルク特性を活かし，より幅広い領域で最適な前後荷重移動を実現することで，自然で心地よい車両挙動を実現した。

その他にも MX-30 BEV には，意のままの走り，すなわちペダルやハンドルの操作に，違和感なく応答することで，コントロールしやすく楽しい運転体験を実現させるために，以下の機能を採用した。

回生協調ブレーキは，ブレーキペダルの操作量からドライバーが必要とする制動力を判断し，その範囲内で最大限のエネルギー回生を行いつつ，不足分を摩擦による制動力で補っている。

モーターペダルは，人の感覚にあったトルクコントロールを可能とした，エンジン車のアクセルペダルに相当するシステムである。発進から停止までモーターペダルだけで操作するシステムについては，マツダの安全思想に基づき採用していない。

EV サウンドは，加速状況に応じて発生するトルクの状態をドライバーが無意識に認知できることを目的とし，モータートルクに同期したサウンドを発生するシステムを採用した。

ステアリングに設置したホイールパドルは，通常走行時の「D」レンジを基準に，加速が強くなり，減速が弱くなるプラス 2 段と，加速が弱くなり，減速が強くなるマイナス 2 段の合計 5 段を設定し，変速可能とした。

3.4　KV#4　進化した安全性能

MX-30 は，車との時間を心から楽しめるように，「MAZDA PROACTIVE SAFETY」の安全思想と技術で磨いた安心・安全性能を提供する。

「MAZDA PROACTIVE SAFETY」とは，ドライバーが安全に運転できる状態を確保した上で，危険を未然に防ぎ，もしものときにも備えている，人間中心のクルマづくりで安全・安心な運転環境を提供し，その先の「走る歓び」へとつなげていく安全思想である。

この安全思想の下，マツダはドライビングポジションをはじめとした基本安全技術，先進安全技術，パッシブセーフティ技術の進化に取り組み続けている。MX-30 でも，誰もが安心して思いのままにカーライフを楽しめるよう，i-ACTIVSENSE に新たな技術を導入したほか，直感的に操作しやすいタッチパネルディスプレーやエレキシフト，衝突時の乗員保護に寄与する強固なバーチカルレインを採用したフリースタイルドアなど，構造にも最新の開発思想と技術を注ぎ込んでいる。

4. おわりに

MX-30 は，もっと自由な発想でクルマを使いたいと願うお客さまに満足いただきながら，マツダのカーボンニュートラル実現へのチャレンジと，お客様の使い方を両立するという新しい考え方から企画した車であり，BEV はマツダブランドの幅を広げるマツダ初の量産電気自動車である。MX-30 では，お客さまの自由な発想で，居心地の良い車内空間で，さまざまな使い方を楽しんでいただくよう，人を中心に考えたつくり込みにより，「走る歓び」をお届けすることを目指している。MX-30 で，多くのお客様の日常や人生に，広がりや輝きを感じていただけることをマツダは願っている。

■著　者■

竹内 都美子

上藤 和佳子

岡田 譲太

岩永 未央

信本 昇二

特集：MAZDA MX-30

03 エレクトリック G- ベクタリング コントロール プラス（e-GVC Plus）の開発

Development of electric G-Vectoring Control Plus (e-GVC Plus)

梅津　大輔 *1　塚野　孝俊 *2　小川　大策 *3
Daisuke Umetsu　Takatoshi Tsukano　Daisaku Ogawa
藪中　翔 *4　加藤　史律 *5
Sho Yabunaka　Fuminori Kato

要　約

MX-30 EV モデルに G- ベクタリング コントロール（GVC）を搭載した。GVC は車両の横加加速度に応じて，わずかな前後加速度を付与することで車両の運動性能を高める。具体的には，ターンインの切り込み操舵に合わせて減速し，ターンアウトの切り戻し操舵に合わせて加速する。この切り戻し操舵における GVC を量産車に搭載するのは世界初であり，応答性に優れる電気モーターを用いて実現できた。電気モーターによる制駆動トルクを，走行状態に合わせて適切に付与する。今般，この GVC にブレーキを用いた直接ヨーモーメント制御を連係させた，エレクトリック G- ベクタリング コントロール プラス（e-GVC Plus）を開発した。本稿では，まず e-GVC Plus の制御則及びシステム構成を紹介する。そして，前後と横加速度，及びロールとピッチが，e-GVC Plus によって滑らかに連係することを実測データで示す。さらに，ドライバーの運転行動へ及ぼす効果を検証した実験結果を紹介する。e-GVC Plus は視線を安定させ，操舵を緩やかにし，修正操舵を減少させることがわかった。

Abstract

G-Vectoring Control (GVC) is installed in MX-30 EV Model. The GVC is a method to control vehicle's longitudinal acceleration according to vehicle's lateral motion. By using electric motor torque, the GVC system is effective not only in a phase of turning in a corner but also in a phase of turning out. The GVC system for EV is called as electric G-Vectoring Control Plus (e-GVC Plus) which coordinates longitudinal and lateral acceleration, and roll and pitch motion. This vehicle dynamics control has beneficial effects on driving behaviors: it stabilizes driver's line of sight, provides mild steering, and reduces steering corrections.

Key words : Vehicle Dynamics, Driving Stability, Chassis Control, Electric Vehicle, Biomechanics

1. はじめに

車両の減速・旋回・加速といった各々の運動を滑らかに連係させることが，運転の楽しさや安心感といったダイナミクス性能の質感を向上させるために重要である。この車両の前後・横運動を連係させる技術として G-Vectoring Control（GVC）を，マツダは高応答な内燃エンジンによって実現した[(1)]。2016 年に初めて量産車に搭載された GVC は，ドライバーの切り込み操舵によって発生する横加加速度に基づいて制動トルクを緻密に制御する。2018 年には，ブレーキユニットを用いて中高 G 旋回時の車両安定性を向上する直接ヨーモーメント制御を備えた G-Vectoring Control Plus（GVC Plus）[(2)] へと進化した。

MX-30 EV モデルに搭載されたエレクトリック G- ベクタリング コントロール プラス（e-GVC Plus）は，内燃エンジンよりも高応答な電気モーターの制駆動トルクを制御し，ターンイン時の制動トルク制御に加えて，ターンアウト時に駆動トルクを制御することで，車両の横運動と前後運動を切れ目なく連係させる。

今般，e-GVC Plus を量産される電気自動車に初めて搭載した。その制御則とシステム構成を，本稿で説明する。そして，e-GVC Plus の有無で運転行動を比較し，e-GVC

*1,2,5　操安性能開発部
Chassis Dynamics Development Dept.
*3　電子基盤開発部
Electronic Platform Development Dept.
*4　技術研究所
Technical Research Center

Plus の効果を検証した結果について報告する。

2. e-GVC Plus のシステム

2.1　e-GVC Plus の概要

e-GVC Plus の制御則は，式(1) と式(2) で示される。式(1) において，G_{xc} は前後加速度の制御指令値，G_y は横加速度，$\dot{G}_y$ は横加加速度，C_{xyd} は切り込み操舵時の制御ゲイン，C_{xya} は切り戻し操舵時の制御ゲイン，T は一次遅れ系の時定数をそれぞれ示す。$G_y \cdot \dot{G}_y > 0$ 時は，高応答エンジンを用いた GVC[(1)] と同様で，$G_y \cdot \dot{G}_y < 0$ 時の加速制御は電気モーターを用いて初めて実現した。式(2) の制御則は GVC Plus[(2)] と同様で，M_{zc} はヨーモーメントの制御指令値，C_m は制御ゲインをそれぞれ示す。式(1) の C_{xyd} と C_{xya}，式(2) の C_m は，エキスパートが綿密にチューニングした。

式(1) の GVC 制御則によって，Fig. 1 のようにドライバーの切り込み／切り戻し操舵のそれぞれに適した，制御ゲインを設定できる。これによりターンインからターンアウトまでシームレスに，適切な制駆動トルクを付与する。

$$\begin{cases} G_{xc} = -\dfrac{C_{xyd}}{1+Ts}\left|\dot{G}_y\right| \\ \qquad (G_y \cdot \dot{G}_y > 0) \\ G_{xc} = 0 \\ \qquad (G_y \cdot \dot{G}_y = 0) \\ G_{xc} = \dfrac{C_{xya}}{1+Ts}\left|\dot{G}_y\right| \\ \qquad (G_y \cdot \dot{G}_y < 0) \end{cases} \tag{1}$$

$$\begin{cases} M_{zc} = \dfrac{C_m}{1+Ts}\dot{G}_y \\ \qquad (G_y \cdot \dot{G}_y < 0) \\ M_{zc} = 0 \\ \qquad (G_y \cdot \dot{G}_y \geq 0) \end{cases} \tag{2}$$

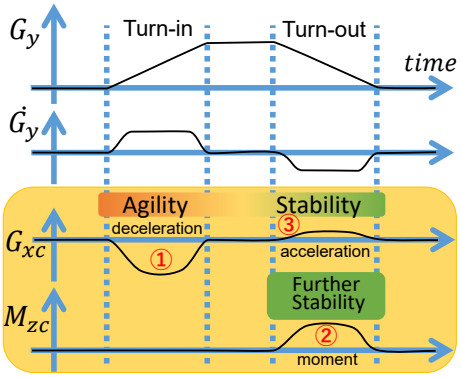


Fig. 1　Time Series Behavior of Motion Control Concept

Fig. 1 における①のターンイン時に減速する GVC は，2017 年に報告[(1)] しており，この①に②の直接モーメント制御を加えた GVC Plus は，2019 年に報告[(2)] した。本稿では，③のターンアウト時に加速する制御を加えた e-GVC Plus について報告する。なお，②は横加速度が大きい領域で作動する。

2.2　電気モーターを用いたシステムの構成と車両運動

MX-30 EV モデルは前輪駆動車であり，電気モーターによって生じる前輪の制駆動トルクを制御して GVC を実現し，ターンアウト時は，ブレーキユニットを用いた直接ヨーモーメント制御によって安定性を向上する。このシステム構成を Fig. 2 に示す。

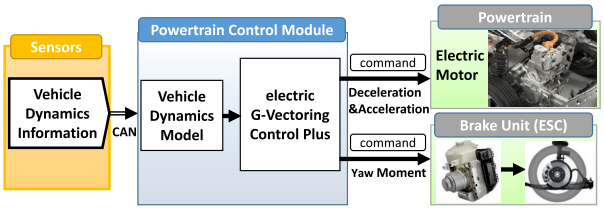


Fig. 2　Motion Control System

実例として，実測した車両運動と制御信号を Fig. 3 と Fig. 4 にそれぞれ示す。80[km/h] の一定速でシングルレーンチェンジを行った結果を Fig. 3 に示す。操舵角 (SWA) に応じて，横加速度 G_y と横加加速度 $\dot{G}_y$，が発生する。これら横加速度と横加加速度の積で，制御指令値の正負が，式(1) と式(2) のとおり決まる。

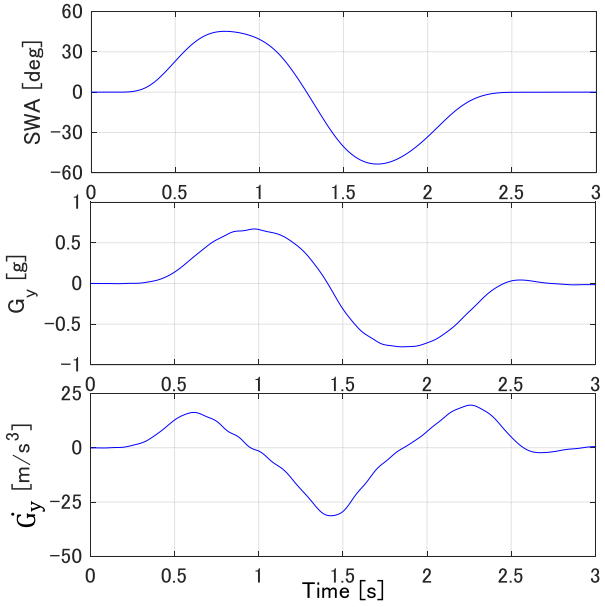


Fig. 3　Time Histories of Vehicle Motions during Lane Change

Fig. 3 に示した横加加速度 $\dot{G}_y$ に合わせて，式(1) と式(2) に従い制御指令値の大きさが決まる。実際の制御指令値を Fig. 4 に示す。GVC req. は電気モーターに指令する制駆動トルク，M＋req. は直接ヨーモーメント制御の指令値である。

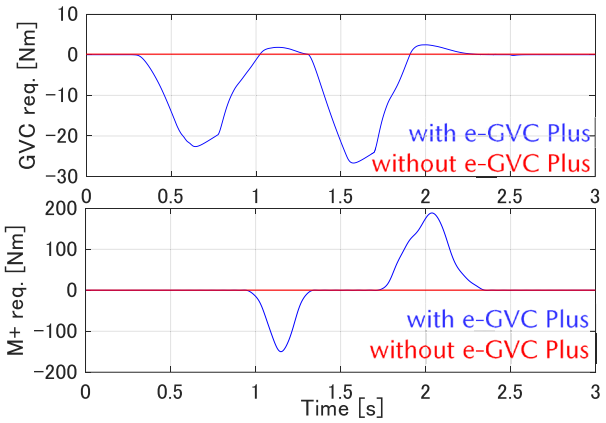


Fig. 4　Time Histories of Control Signals during Lane Change

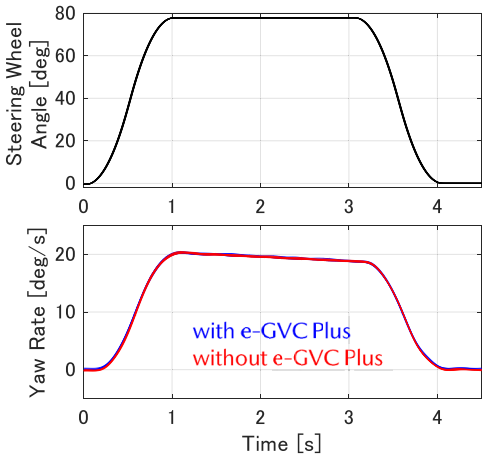


Fig. 5　Steering Wheel Angle and Yaw Rate

Fig. 4 において GVC req. が減速側の絶対値が大きく，加速側の絶対値が小さいのは，式(1) の GVC 制御則における C_{xyd} と C_{xya} に異なる値を設定しているためである。路面や風圧等さまざまな要因で自然に発生する減速とは異なり，アクセルペダルの操作を伴わない加速はドライバーにとって違和感となるため，ドライバーの切り込み操舵における制御ゲイン C_{xyd} に対し，切り戻し操舵の制御ゲイン C_{xya} は 1/10 程度とした。このように切り戻し操舵時の加速は僅かであるが，フィーリングに及ぼす影響は大きく，後述するようにドライバーの視線や操舵を安定させる。

2.3　前後・横加速度及びロール・ピッチの連係

ここでは e-GVC Plus の中で，式(1) を制御則とする GVC について，車両の運動へ及ぼす効果を示す。自動操舵装置を用いたオープンループ試験で，GVC 有無の 2 仕様において試験を実施した。試験モードは，車速 50 [km/h] 以上まで加速した後にアクセルオフし，車速が 50[km/h] になった瞬間に Fig. 5 の操舵角を自動操舵装置で与える走行モードとした。ヨーレイトについては GVC の有無で差がなく，操舵に対して同じように応答している。このような穏やかな操舵の走行では，Fig. 1 における②の直接ヨーモーメント制御は作動せず，Fig. 1 における①③の加減速制御のみ作動する。

直進から操舵角を切り込むターンイン，操舵角一定の旋回，そして直進状態に操舵角を切り戻すターンアウトを通じた走行モードで計測実験を行った。

計測した前後加速度と横加速度を Fig. 6 に示す。前後加速度は，Fig. 1 で示した制御コンセプトと対応して，GVC によって切り込み操舵時に減速し，切り戻し時に遅滞なく僅かに加速した。一方で，横加速度は，GVC の有無でほとんど差がなかった。

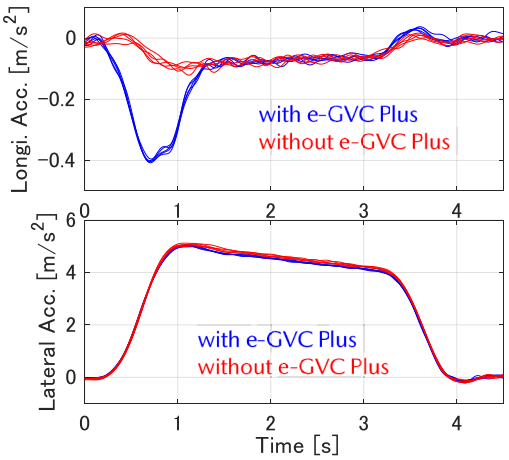


Fig. 6　Longitudinal and Lateral Acceleration

GVC なしの “g-g” ダイヤグラムを Fig. 7 に，GVC ありの “g-g” ダイヤグラムを Fig. 8 に示す。Fig. 7 の制御なしでは，前後加速度の変化が小さく，前後加速度と横加速度が不連続に折り返している。一方で，Fig. 8 では加速度が滑らかにつながっている。また，ターンアウト時 (Fig. 6 では 3 秒から 4 秒の間) に，ごく僅かであるが加速している。ターンインからターンアウトまで前後加速度と横加速度が滑らかにつながる。

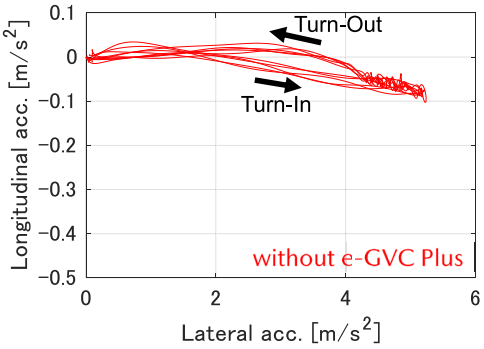


Fig. 7　Longitudinal Acc. vs Lateral Acc. without e-GVC Plus

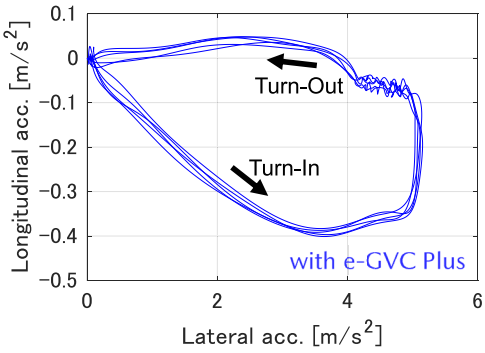


Fig. 8　Longitudinal Acc. vs Lateral Acc. with e-GVC Plus

次に，計測したロール角とピッチ角を Fig. 9 に示す。ロール角については，GVC の有無でほとんど差がなかった。一方で，ピッチ角については，前下がりとなるタイミングが GVC によって早まり，ピッチ角とロール角の時間差が小さくなった。

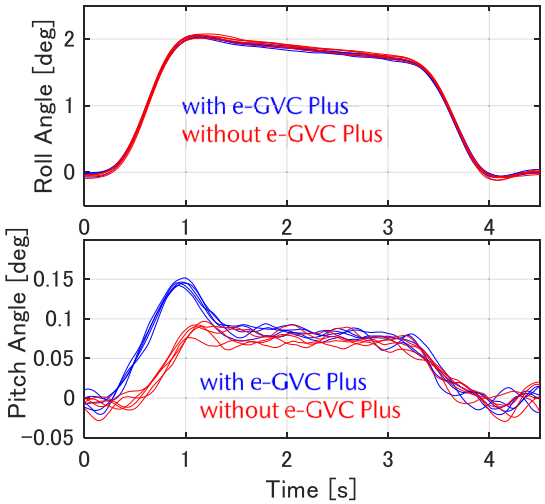


Fig. 9　Roll and Pitch Angle

このロール角とピッチ角の時間差が小さいと，官能評価が良好である[3]。また，切り込み操舵に合わせてピッチ角を付加することで，走行軌跡のバラツキを低減できる[4]。これらの観点から，人が評価する操縦安定性能にとって望ましい運動特性が GVC によって得られていると考えられる。

ロール角とピッチ角の関係について，GVC なしを Fig. 10 に，GVC ありを Fig. 11 に示す。GVC によって，切り込み操舵時にロール角とピッチ角が滑らかに連係する。

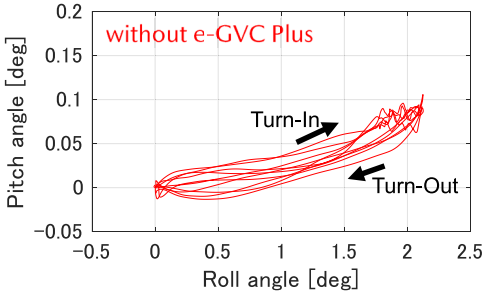


Fig. 10　Roll Angle vs Pitch Angle without e-GVC Plus

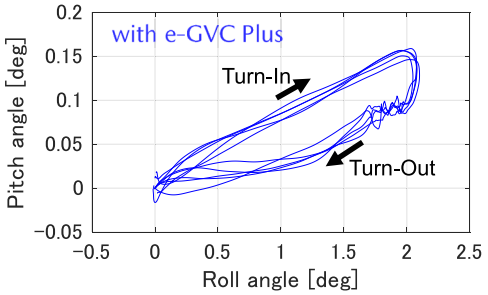


Fig. 11　Roll Angle vs Pitch Angle with e-GVC Plus

3. 人間 - 自動車系における e-GVC Plus の効果

3.1　コーナリング中の人の視線への効果

先行研究[5]は，人の歩行中の視線運動は最大ピッチ角速度が 3[deg/sec] 程度であると報告している。同様に運転中も，ピッチ角速度が小さいと視線が安定しており，明瞭な視覚を保っていると考えられる。

そこで，1）GVC なし，2）減速 GVC のみ，3）加減速 GVC（e-GVC plus），4）加速ゲイン C_{xya} を減速ゲイン C_{xyd} と等しくした加速が過剰な GVC の各仕様について 5 試行ずつ計測した。車速 30[km/h]，半径 15[m] で 180[deg] の旋回する走行モードにおいて視線のピッチ角速度を計測した結果を，Fig. 12 から Fig. 15 に記す。

なお，この走行モードでは，Fig. 1 における②の直接ヨーモーメント制御は作動しない。

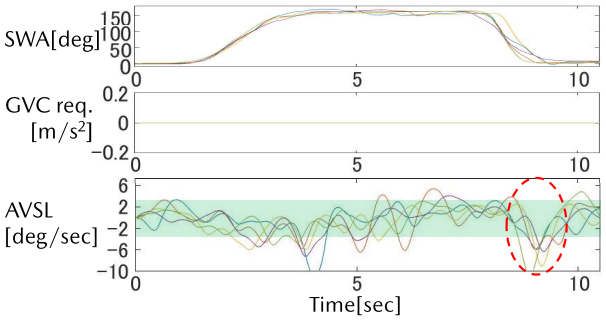


Fig. 12　Angular Velocity of Sight Line (AVSL) without GVC

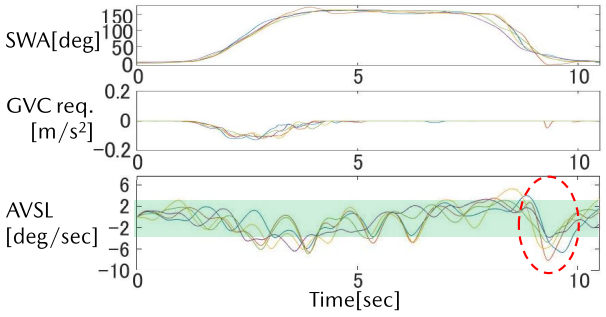


Fig. 13　Angular Velocity of Sight Line (AVSL) with Deceleration GVC

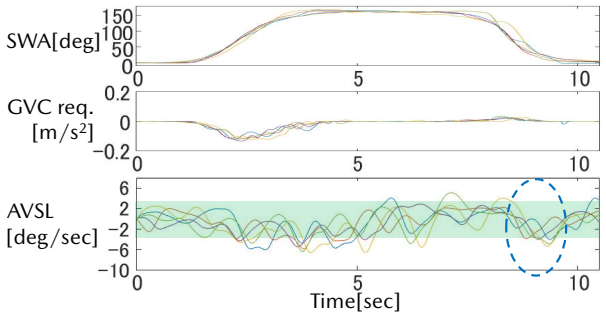


Fig. 14　Angular Velocity of Sight Line (AVSL) with Deceleration & Acceleration GVC

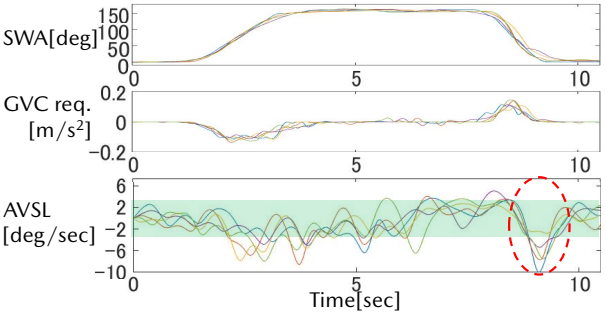


Fig. 15　Angular Velocity of Sight Line (AVSL) with Deceleration & Excess Acceleration GVC

MX-30 EV モデルに搭載された e-GVC Plus と同じ設定の GVC を行う Fig. 14 の結果のみ，ターンアウト時に視線のピッチ角速度が小さいことがわかる。このように，適切な設定の GVC は，人の負担を軽減する。なお，視線に加え，GVC によって頭部と胸郭が連動して動くことが観測されており，詳細は文献[6] に示す。

3.2　レーンチェンジ中の操舵行動への効果

3.1 では緩やかなコーナリング中の視線について分析した。本節では，操舵行動について分析する。ダブルレーンチェンジモードで，時系列の操舵角変化を比較する。約 50[km/h] の車速で進入しアクセルオフで操舵のみを行う，ダブルレーンチェンジ試験を行った。ISO 3888-2 に準じてレーンチェンジコースを設定し，進入路は車幅×1.1＋0.25[m] と狭く設定した。これにより，操舵の開始タイミングが制限される。e-GVC Plus 有無の 2 仕様について比較する。なお，この走行モードにおいては，Fig. 1 における①②③全ての制御が作動する。

脱出速度が近いものを，e-GVC Plus の有無で其々選び，時系列の車両運動を Fig. 16～18 で比較する。まず，Fig. 16 に車速と操舵角を示す。脱出車速は，e-GVC Plus の有無で同じであるが，進入車速は e-GVC Plus があると速い。しかしながら，より緩やかに余裕をもった操舵が，e-GVC Plus によってできている。

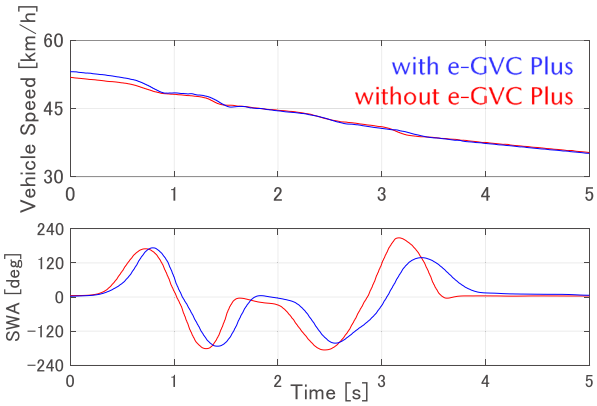


Fig. 16　Vehicle Speed and Steering Wheel Angle

e-GVC Plus によって，ロール角に同期した前下がりのピッチ角が発生し，先行研究[7] からドライバーのヨー認識が強調されると考えられる。そして，e-GVC Plus があると「操舵に対する応答がよい」とドライバーはコメントし，Fig. 16 のように緩やかに最大舵角まで操舵している。一方で e-GVC Plus がないと，操舵速度を速めて切り増している。この操舵行動について，ドライバーは「操舵初期の応答が足りないと感じて切り増した」とコメントした。このような GVC による切り込み操舵の変容は，先行研究[1] でも観測されている。レーンチェンジの後半についても，e-GVC Plus があると，操舵角の絶対値が小さく滑らかである。

Fig. 16 において，e-GVC Plus がないと操舵の完了が早いが，この時点で Fig. 17 のヨーレイトは収束しておらず，車両運動が収束するタイミングは，e-GVC Plus の有

無で変わらない。e-GVC Plus がないと，直進に戻る際に車両運動の収まりが悪く，ヨーレイトが揺らぎ，収束に時間を要する。

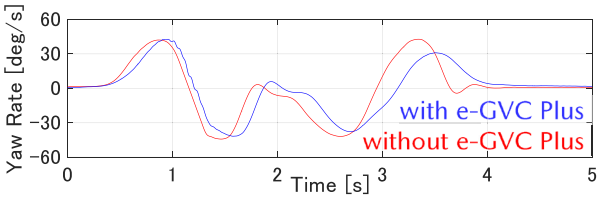


Fig. 17　Yaw Rate

Fig. 18 には，前後加速度と横加速度を示した。まず，e-GVC Plus があると，操舵初期に早く減速し，その後も横加速度の変容に沿って，前後加速度が生じる。横加速度の立ち上がりで，e-GVC Plus があると大きく減速するが，切り戻し操舵では加速するゆえ，車速低下は抑えられている。また，ヨーレイトと同様に，e-GVC Plus があると横加速度は穏やかに収まる。

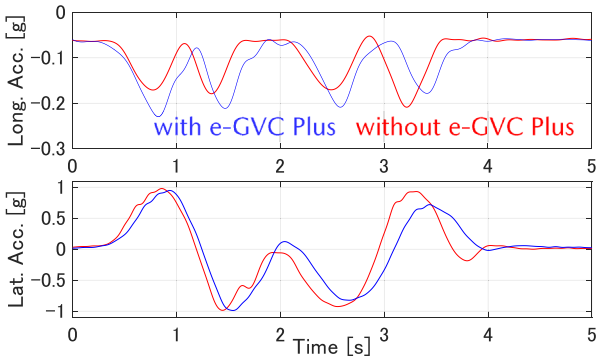


Fig. 18　Longitudinal and Lateral Acceleration

3.3　ワインディングコースにおける修正操舵の低減効果

ドライバーがペダル操作で 50[km/h] の一定速を保ち，コーナーが連続したワインディング路を走行し，操舵角を計測した。計測した操舵角を Fig. 19 に示す。1 周 200 秒のコースを 2 周走行したデータである。制御なし，減速 GVC のみ，と加減速 GVC（e-GVC plus）の 3 仕様でほとんど同じように走行している。

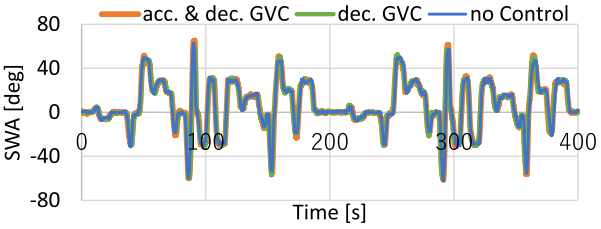


Fig. 19　Steering Wheel Angle Behavior on Winding Course

Fig. 19 で示した時系列の操舵角データについて，ドライバー負担を評価するステアリングエントロピ法[8] を適用した。ステアリングエントロピが小さいと，時系列の操舵角がスムーズに推移し，いわゆる修正操舵が少ない。制御なし，減速 GVC のみ，と加減速 GVC の 3 仕様について比較した結果を Fig. 20 に示す。まず，減速 GVC によって修正操舵が減り，更に加速 GVC が加わることで更に修正操舵が減少することが分かる。

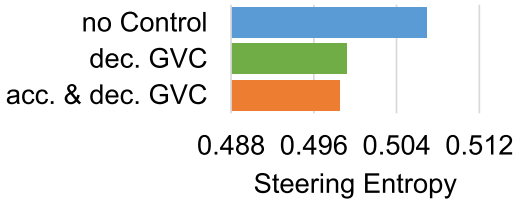


Fig. 20　Steering Entropy

Fig. 19 に示したワインディング路走行中の操舵角について，155 秒から 175 秒に絞った時系列グラフを Fig. 21 に示す。制御なし（青線）は舵角変化の曲率が大きく，ドライバーが急峻に操舵角を変えていることが分かる。一方で，減速 GVC のみ（緑線）や加減速 GVC（橙線）は，舵角変化の曲率が小さく滑らかに操舵している。161 秒や 169 秒辺りの切り戻しに注目すると，減速 GVC のみ（緑線）よりも，加減速 GVC（橙線）は緩やかに切り戻していることが分かる。このような時系列でみた操舵角のスムーズさが，Fig. 20 のステアリングエントロピに表れており，加減速 GVC の実験仕様が最もステアリングエントロピが小さく，修正操舵が少なかったと考えられる。

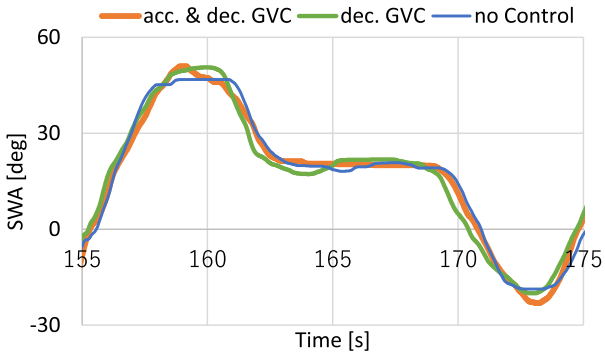


Fig. 21　Steering Wheel Angle Behavior (155-175 sec.)

4. まとめ

高応答エンジンを用いた GVC[1] に直接ヨーモーメント制御を加えた GVC Plus[2] から，更に高応答な電気モーターを活用して切り戻し操舵時の加速制御を加えた e-GVC Plus を MX-30 EV モデルで初めて実現した。

電気モーターという高応答なアクチュエータを用いた GVC によって得られる前後，横加速度や，ロール・ピッチなどの車体姿勢角が滑らかに連係する運動特性は，

ターンインからターンアウトを通してドライバーの視線を安定させ，操舵を滑らかにし，修正操舵を減少させることが分かった。この制御効果により，雪上のレーンチェンジ走行においても Fig. 22 に示すように挙動の収束性に優れた運動特性が得られた。

以上の結果は，日常域の微小な挙動から高 G 旋回まで，幅広いシーンにおいて，ドライバーとしての人の特性に合致した心地よい運動特性を追求した制御開発の結果と考える。マツダは今後も，人にとってより制御しやすい車両運動のあり方を追求し，運転の楽しさや安心感といったダイナミクス性能のさらなる質感向上に取り組んでいく。

Fig. 22　Lane Change on Snow-covered Ground

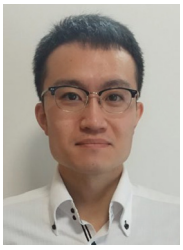
参考文献

(1) 梅津ほか：G-Vectoring Control の開発，マツダ技報，No.34, pp.99-104（2017）
(2) 梅津ほか：G-Vectoring Control Plus の開発，マツダ技報，No.36, pp.235-240（2019）
(3) 山本ほか：視覚・動揺感受性に基づく操舵過渡応答性能の向上（第 2 報）―ロール感の解析―，自動車技術会前刷集，No.10-06, pp.5-9（2006）
(4) 田尾ほか：微小操舵域のライントレースのバラツキを低減するピッチ特性に関する研究，自動車技術会論文集，Vol.52, No.2, pp.286-292（2021）
(5) Grossman, G. E. et al.: Performance of the human vestibuloocular reflex during locomotion, J. Neurophysiol, vol.62, pp.264-272（1989）
(6) 藪中ほか：G-Vectoring 制御が人の視線や身体挙動に与える効果に関する分析，自動車技術会 2020 年春季大会学術講演会講演予稿集，No.12-21, pp.1-6（2021）
(7) 酒井ほか：過渡的な旋回感覚を強調する減衰力制御―カルマンフィルタを用いたロール・ピッチ同期化制御―，自動車技術会論文集，Vol. 43, No. 3, pp. 709-716（2012）
(8) 中山ほか：運転者負荷定量化手法「ステアリングエントロピ法」の開発，自動車技術会前刷集，No.45-99, pp.5-8（1999）

■著　者■

梅津 大輔

塚野 孝俊


小川 大策

藪中 翔

加藤 史律

特集：MAZDA MX-30

04 MX-30 EV MODEL のモーターペダル開発
Motor Pedal Technology for New Mazda MX-30 EV Model

森下　慎也 *1　梅津　大輔 *2　光永　誠介 *3
Shinya Morishita　Daisuke Umetsu　Seisuke Mitsunaga
津田　顕 *4　岡田　光平 *5　服部　之総 *6
Akira Tsuda　Kohei Okada　Yukifusa Hattori

要　約

マツダは「人間が本来持っている能力を最大限に発揮させること」を追求した人間中心の考えに基づき，ドライバーとクルマが一体となる人馬一体の車づくりを目指している。マツダ初の量産電気自動車となる MX-30 EV モデルも，人間中心の考えに基づき，モーターの特性を最大限に活用して人馬一体を追求した。マツダでは，EV においてドライバーがより意のままに車速や加減速をコントロールするための，ペダル，パワーユニット，オーディオユニットを含めた統合制御システムを「モーターペダル」と呼ぶ。アクセルペダルによるモータートルクのコントロール性を全域で緻密に制御し，サウンドによるモータートルクの向きと大きさの知覚をサポートすることで，ドライバーがまるで筋肉のように自在に車速コントロールできることをねらった。更にさまざまな走行シーンに対応する EV 専用のステアリングホイールパドルと合わせて紹介する。

Abstract

Mazda is committed to delivering “Jinba Ittai” feel, which represents a harmonious relationship between the driver’s will and vehicle motion, in its vehicles based on a human-centered approach supported by maximized human capabilities. We pursued the Jinba Ittai feel in Mazda’s first mass production EV Model by enhancing electric-motor characteristics based on the human-centered approach. The motor pedal is unique integrated control system including pedal, power unit and Audio unit that makes it possible for the driver to control driving torque precisely with assistance of driver’s perception in torque directions and the amount through sounds. A steering wheel paddle has also been developed as a new function to enhance speed controllability.

Key words : EV and HV systems, Motor drive system, Motor characteristics, Sound quality evaluation, Motor pedal, Steering wheel paddle, e-SKYACTIV

1. はじめに

これまでマツダは，ICE（Internal Combustion Engine）車において，より運転しやすいドライビングポジションや，踵を安定して操作できるオルガン式アクセルペダルなどの操作系と，ドライバーの要求である目標加速度を上位においたエンジントルク制御システム[(1)] によって，よりリニアで意のままの車速コントロール性を追求してきた。またエンジンサウンド開発においては，ドライバーの知覚特性を研究することで，音によって駆動トルクの認知性を向上させる取り込みを行い[(2)]，車両全体として一体感のある走りの実現を目指してきた。

MX-30 EV モデルでは，これまで ICE で得た知見を基に，モーターによるトルク制御の自由度の高さと，モーターの負荷状態を正確に伝えるオーディオユニットによるサウンドを活用することで，ICE 以上に一体感の高い走りの開発に取り組んだ。また EV ならではの新機能として，勾配などの走行シーン変化に応じて，モータートルクの回生減速と惰行（コースティング）を自在にコントロール可能なステアリングホイールパドルを開発した。

*1〜2　操安性能開発部
Chassis Dynamics Dept.
*4〜5　走行・環境性能開発部
Driveability & Environmental Performance Dept.
*3,6　NVH 性能開発部
NVH Performance Dept.

2. モーターペダル

2.1　ねらい

モーターペダルのコンセプトを Fig. 1 に示す。ドライバーがまるで自身の筋肉のように直感的に車両の加減速をコントロールできるよう，モータートルクの向きと大きさをドライバーが知覚しやすいこと，そしてそのモータートルクが車両に伝わり加減速挙動となるまでの遅れが最小限となることに注目して，システムを開発した。

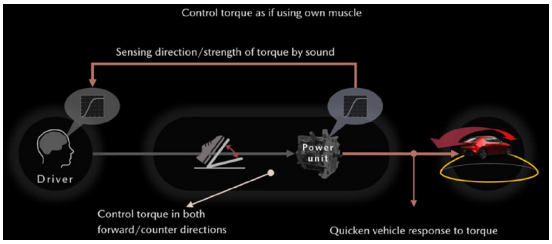


Fig. 1　Motor Pedal Concept

2.2　人間の操作から車両応答までの時間最小化

モーターペダルコンセプトを実現するためには，ドライバーのペダル操作に対する車両の加減速挙動の応答時間の最小化が重要となる。

(1) パワーユニットによる応答遅れ改善

内燃エンジンと電気モーターの駆動トルク応答性の違いを Fig. 2 に示す。MX-30 EV モデルと同等の最大トルクをもつ直列 4 気筒 2.5L エンジンに比べて，アクセルペダル操作に対する駆動トルクの応答時間が約 50%低減している。

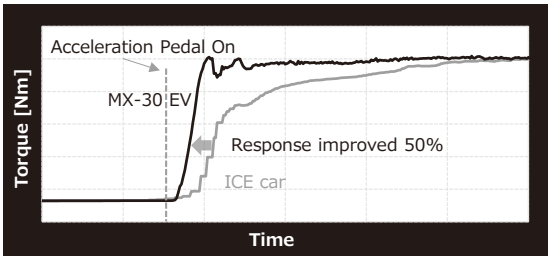


Fig. 2　Comparison of Torque Response

(2) 車体の高剛性化による応答遅れ低減

上記 (1) はユニットとしてのトルク応答性の違いであり，これを車両として実現するためには，トルクを受け止める車体側の剛性を高める必要がある。そこで，ドライブシャフト剛性やモーターマウント剛性を高めて最適化した（Fig. 3）。

その結果，Fig. 4 に示すように，アクセルペダル操作に対する車両の加速度応答時間についても，ICE 比で約 60%低減した。

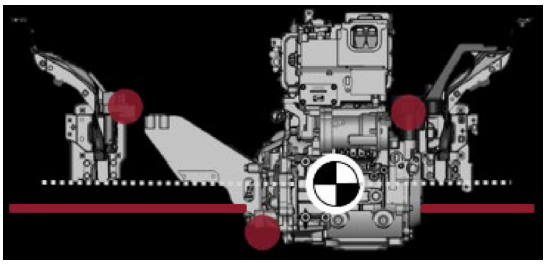


Fig. 3　Motor-Mount and Drive Shaft

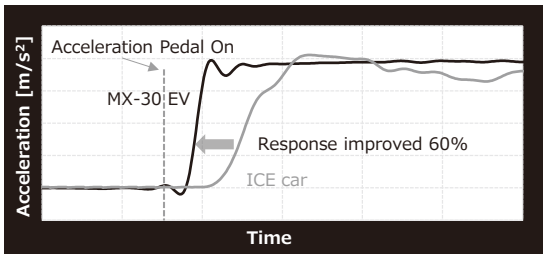


Fig. 4　Comparison of Acceleration Response

2.3　モータートルク制御

加減速におけるモータートルクをシームレスにコントロールするため，アクセルオフ操作によるモーター回生減速度や，トルクがゼロを跨いでプラスとマイナスを行き来する領域も含めて，アクセル操作による目標加速度制御を緻密に設定した。

Fig. 5 に PCM（Powertrain Control Module）におけるモーターペダルの制御ブロック図を示す。①のアクセルペダル操作量に対する目標加速度・減速度の制御を以下 (1) (2) (3) で，②のアクセルペダル操作速度に関する制御を (4) で，③のバックラッシュ制御を (5) で説明する。

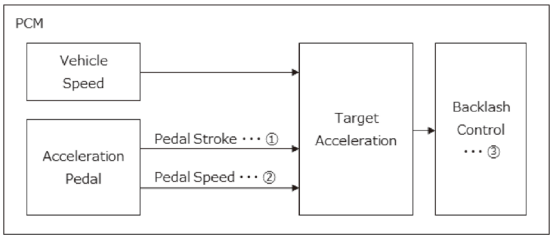


Fig. 5　Motor Pedal Control Flow in PCM

(1) モーター回生による減速度制御

EV の駆動力制御においてポイントとなるのはモーター回生による減速度の設定である。MX-30 EV モデルではブレーキ・バイ・ワイヤユニットによる協調回生ブレーキシステムを採用しているため，ブレーキペダル操作によっても摩擦ブレーキを使わずにエネルギー回生による減速が可能である。そのため，アクセルペダル，ブレーキペダルのどちらにモーター回生による減速度を割り当てるかは自由であり，ドライバーの運転姿勢やコントロール性を重視した設定が可能となる。そこで，アクセルオフ操作に割り当てるべき減速度の最大値を検討した。

アクセルペダルを戻すときは，ドライバーは Fig. 6 に示すように右足のすねの筋肉（前脛骨筋）を収縮させてつま先を引き上げる。これは車両の減速による慣性力の向きに逆行する運動であり，操作の負担感が大きい。実車で検討した結果，1.5m/s^2 までの小さな減速度であれば，足にかかる慣性力も小さく，つま先の引き上げによる減速コントロールが楽にできることが分かった。そこで MX-30 では，アクセルオフ操作による最大減速度を 1.5m/s^2 に設定し，それより大きい減速度は Fig. 7 のようにブレーキペダル操作に割り当てることとした。

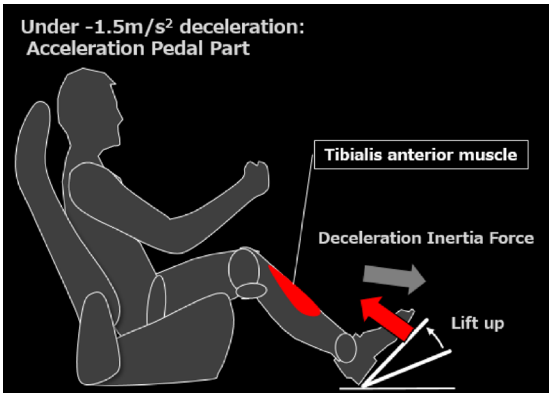


Fig. 6　Re-gen Deceleration Control by Acceleration Pedal

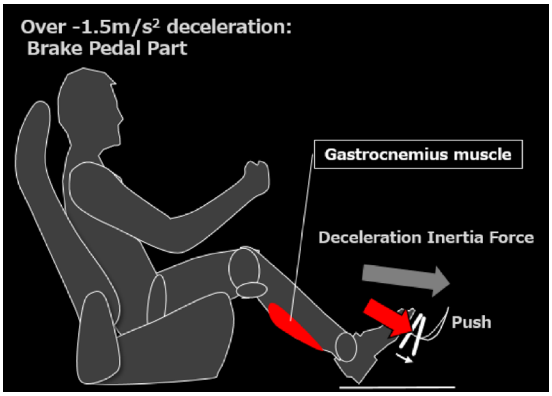


Fig. 7　Re-gen Deceleration Control by Brake Pedal

Fig. 8 に，アクセルペダルとブレーキペダルが受けもつモータートルクの領域の概念図を示す。1.5m/s^2 に相当するマイナス（回生）トルクの領域までをアクセルペダルに割り当て，それより大きな減速度はブレーキペダル操作によって回生する構成とした。これにより，幅広い走行シーンによってドライバーの負担感なしにエネルギー回生を行うことが可能となった。

（2）極低速におけるクリープ現象の設定

EV では，停車前後のペダルによる挙動コントロールの自由度が高く，アクセルオフ操作のみで停車を実現する車両も存在する。一方マツダでは，上り坂での停止からの発進や，駐車場における極低速の車速コントロール性

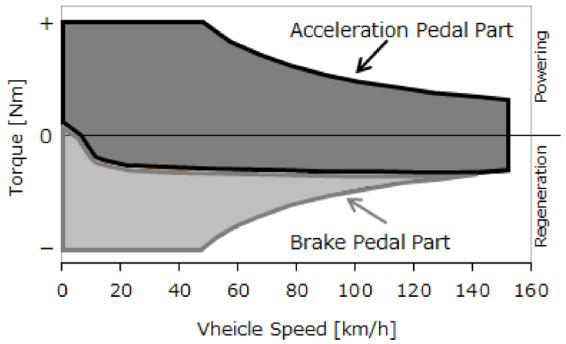


Fig. 8　Partition of Motor Torque Control

を重視するため，停車からのブレーキオフ操作時にトルクコンバーター式 AT 車両のようなクリープ現象を設定し，車両の停止はブレーキペダル操作で行うこととした。

クリープ現象は，Fig. 9 に示すように，車両の動き出しが穏やかで，ドライバーが予測可能な特性とした。これによって，駐車場でブレーキに足を載せたまま前進・後進の切り替えをしたり，ドライバーが平坦と感じるような緩い上り坂での意図しない車両のずり下がりを防止したりと，より安全な運転が可能となる。

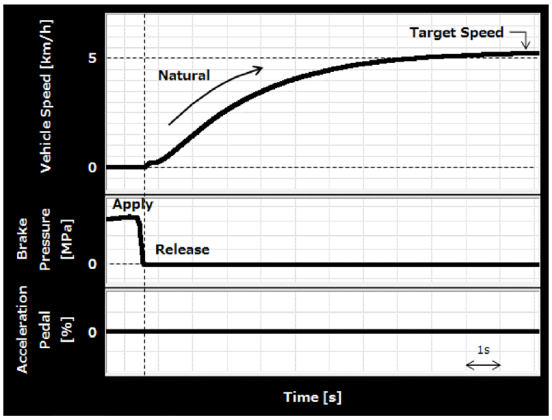


Fig. 9　Creep Characteristic

（3）アクセルペダル操作量と加速度特性

加速側は，ICE で構築してきた目標加速度制御[1] に基づき，ドライバーのペダル操作から加速意図を汲み取ってトルクを発生させる。EV においても，アクセルペダルの操作量（ストローク）に加えて，ペダル操作速度によって加速度の特性を変化させる制御とした。

アクセルペダルの操作量ごとにピーク加速度をプロットした図を Fig. 10 に示す。アクセルペダルストロークの全域を有効に使って加速度をコントロールできるような特性とした。

（4）アクセルペダル操作速度とジャーク特性

アクセルペダルの操作速度ごとに発生する車両のジャーク（加速度の時間変化率，加加速度もしくは躍度）をプロットした図を Fig. 11 に示す。この特性から，ドライバーがアクセルペダルをゆっくり踏み込めば穏やかな

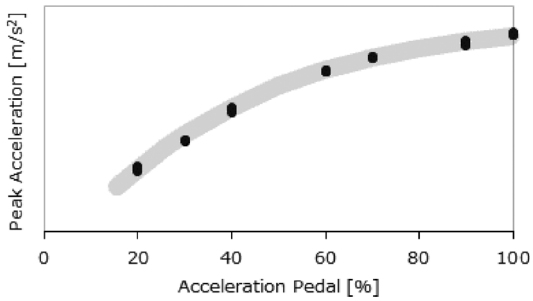


Fig. 10　Pedal Stroke vs. Longitudinal Acceleration

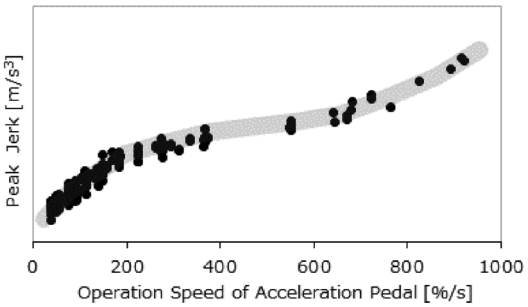


Fig. 11　Pedal Speed vs. Longitudinal Jerk

加速を，素早く踏み込めば鋭い加速をするという，ねらいどおりの緻密な加速コントロール性を実現していることが分かる。

（5）トルクのゼロ点跨ぎコントロール

EV においては，駆動トルクだけでなく回生トルクももつことから，トルクがゼロ点を跨いでプラス側とマイナス側を行き来する。この際，トルクの向きが変わるときに，ギヤのかみ合いによる機械的なバックラッシュ（ガタ）が発生する。具体的には，減速から加速に移行するシーン，逆に加速から減速に移行するシーンにおいて，モーターアクスルユニット内で発生する現象である。MX-30 EV モデルでは，このバックラッシュを最小限にしつつ，機械的な限界でどうしても発生してしまうガタを抑制する制御を採用し，トルクのゼロ点跨ぎ時の滑らかさを実現した。

Fig. 12 に，制御の有無による車両挙動の違いを示す。制御なしの場合，モータートルクは電流指示のとおりに直線的にゼロ点を跨ぐが，バックラッシュの影響で車両の加速度にはショックが発生する。この現象に対して，ゼロ点付近におけるモータートルクの変化率を適切に制御することでショックを抑制した。これにより，一定車速を維持したいシーンや，加減速を繰り返すようなシーンにおいても，滑らかで心地よい挙動を実現した。

2.4　サウンドによるトルクの知覚サポート

ドライバーに走行状態をより正確に伝えるため，EV サウンドを開発した。これは，負荷に応じた音を発生しない電気モーターにおいて，駆動トルクに同期したサウンドをオーディオユニットによって人工的に生成し，乗員のトルク知覚をサポートすることで意のままの走りのコントロール性を実現するものである。

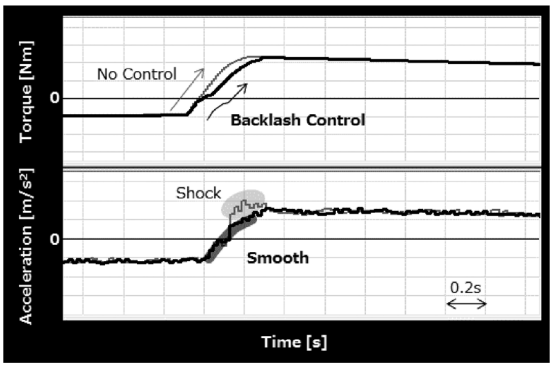


Fig. 12　Motor Torque Control around 0 Nm

（1）人と音の関わりを軸としたサウンド

サウンド創りの根拠としたのは自然界の法則である。ヒトは，力の差を，音だけでイメージすることができ，無意識に次の行動に活かしている。力が大きいほど，発せられる音は①低い周波数の割合が多く，②周波数の数が多く，③音量が大きくなる，という自然界の法則に由来する（Fig. 13）。

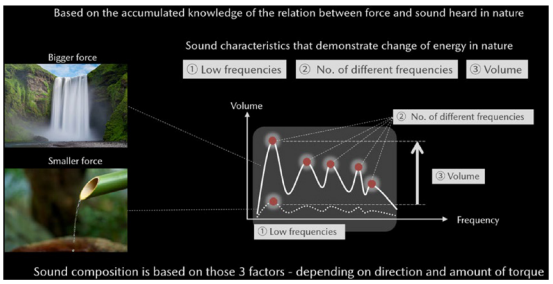


Fig. 13　Sound Characteristic Change of Energy Nature

（2）EV ユニークのサウンド構成

EV サウンドを構成する音は，EV がもともともつ固有の特性由来のものとし，モーター回転数に比例する周波数の音（以降，次数音と呼ぶ）を用いた。モータートルクの増加に応じて，聞こえる次数の数と音量が増えるように設定した。また，次数構成は，ヒトにとって心地よいと感じるサウンドとするための工夫をした。留意したのは，周波数の上下限を設けたこと，協和度の高い次数構成にしたことである（Fig. 14）。

速度変化がよく分かるように，周波数の傾きが大きい次数音を使いたい一方，EV モーターは使用回転域が 0 から 12,000 回転と広いため，高い次数音はすぐに耳障りな高周波音となってしまう。そのため，上限周波数を決めるとともに，「次数音をスムーズに切り替えることでヒトには回転数が上昇しているように聞こえる」という無限音階理論を用いて，不快な高周波音を発生させることなく回転変化が分かるようにした。また，低周波の音が

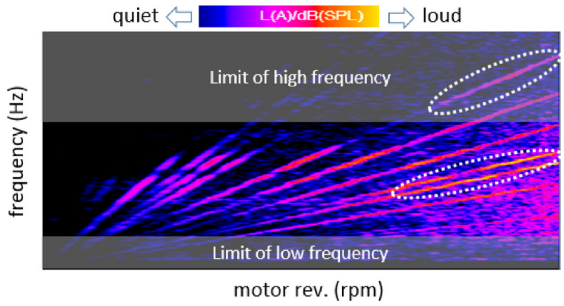


Fig. 14　Configuration of the EV Sound

増えすぎると走りを重ったるく感じてしまうため，周波数の下限も設定した。

次数の組み合わせついては，協和度（Fig. 15）の高い組み合わせの中から，速度変化の分かり易さと聞き心地の良さを両立する最適なものを選定した。また，アクセルを踏み込んでも強い加速度が得られない高車速域では，高めの周波数と不協和音（Fig. 14 の白点線領域）を設定することで加速感を演出した。

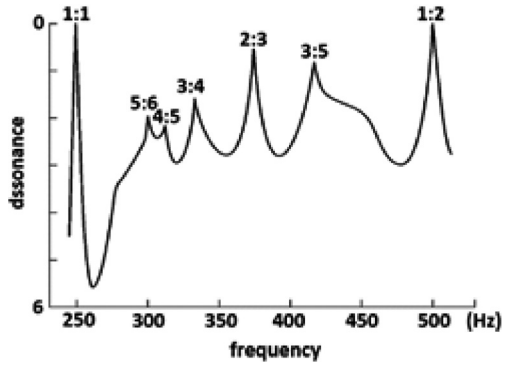


Fig. 15　An Example of Consonace

（3）EV サウンドの効果

EV サウンドの効果を検証するため，減速・旋回・加速シーンと上り・下り勾配をもつワインディングコースにて，サウンドなし（Base）とあり（Motor Pedal）による車速のばらつきを比較計測した。ドライバーは 6 名で，コース上に表示されている車速を目標とした。Fig. 16 に，計測区間内の 6 名の車速のばらつきを平均した結果を示す。

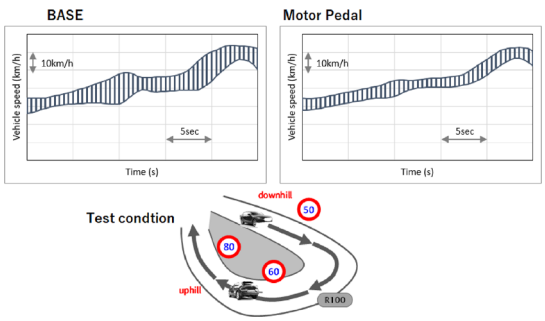


Fig. 16　EV Sound Effect Result/Test Condition

この結果から，EV サウンドの効果によって，車速のばらつきが全体で約 40%低減できることがわかった。ねらいどおり，モータートルクに同期したサウンドを乗員に伝えることで，より正確に走りをコントロールできることを確認した。

3. ステアリングホイールパドル

3.1　ねらい

EV では，ICE のエンジンブレーキと異なり，回生トルクによってより強いアクセルオフ減速度を設定できる。これにより，街中においては強いアクセルオフ減速度によって素早い減速が可能となる一方，例えば上り坂では強いアクセルオフ減速度は車速の低下を招いてしまうし，車速を一定に保ちたい高速道路においてはアクセルペダルを緩めることができない状況となる。

そこで MX-30 EV モデルでは，勾配などの走行シーン変化に応じて，アクセルオフによるモータートルクの回生減速と惰行（コースティング）をドライバーが自在に選択可能なステアリングホイールパドルを開発した。

ステアリングホイールパドルのコンセプトを Fig. 17 に示す。パドル操作によってアクセルペダルストロークに対する加速度・減速度の割り当てを変化させることで，まるで車両後部に取り付けたパラシュートが開いたかのように車両の走行抵抗を自在にコントロールできる感覚を目指した。

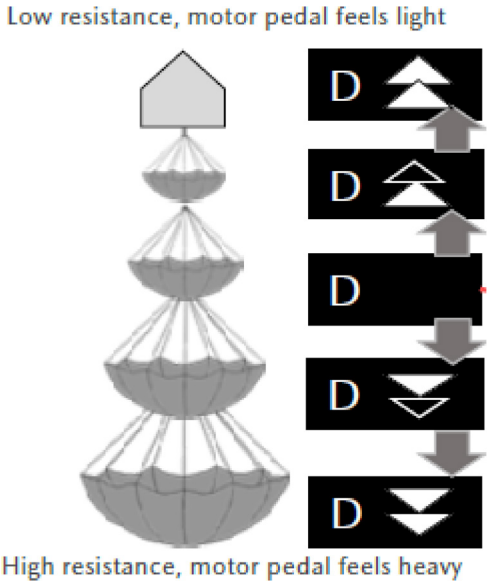


Fig. 17　Concept of Steering Wheel Paddle

3.2　特徴

ステアリングホイールパドルは計 5 段とし，デフォルトの D レンジを中央にレイアウトし，左側に 2 段，右側にも 2 段と対称形に設定した（Fig. 18）。

左側のパドルを操作すると，アクセルオフ減速度が強

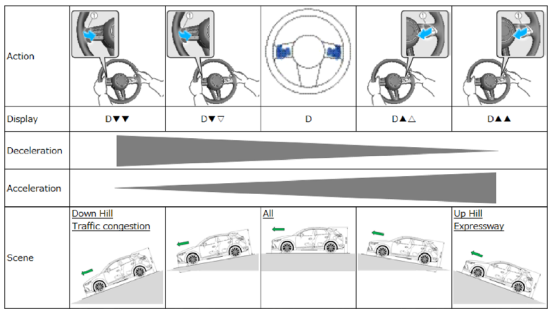


Fig. 18　Paddle Behavior and Usage Scene

まるとともに，アクセルオン加速度の応答が穏やかになる。これによって車両の走行抵抗が増したような状態となり，下り坂ではブレーキペダルを踏む頻度を減らしながら，一定の車速を保つことが容易となる。左側 2 段目の D ▼▼では，公道の勾配設定基準である道路構造令における最大の下り勾配までをアクセルオフでカバーすることをねらった。

右側のパドルを操作すると，アクセルオフによる減速度が弱まり，2 段目の D ▲▲では回生トルクがほぼゼロの惰行の状態となる。アクセルオンの加速は鋭くなるため，走行抵抗が低減したような状態となる。これにより，上り坂や高速道路での車速維持が容易となり，登坂加速や追抜き加速もより楽にできる。

各パドル段位における，アクセルペダル操作量に対する加速度・減速度の設定イメージを Fig. 19 に示す。アクセル全開時（100%）の最大駆動トルクは同一であるのに対し，アクセルオフ時の最大回生トルクには差をつけることで，ペダル操作に対する加速度応答の傾きが変化するため，ドライバーはパドル操作によって走行抵抗が変化したかのように感じられる。

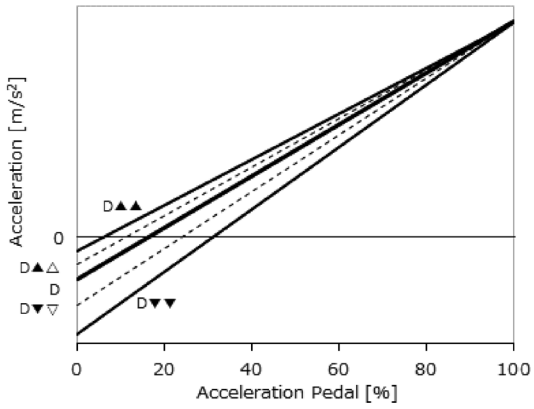


Fig. 19　Pedal Stroke vs. Acceleration in Each Paddle Step

また，各パドル段位の間に明確なトルク段差を設けることで，ドライバーがパドル操作時の段位変化を認知しやすくした。このトルク段差に連動して EV サウンドも変化するため，より直感的な操作が可能である。ワインディングにおいては，このパドル操作を積極的に活用することで，よりダイナミックに加減速と荷重移動のコントロールを楽しむことができる。

4. おわりに

MX-30 EV モデルのモーターペダル開発では，ステアリングホイールパドルの新機能とともに，人間中心の考えのもと，ICE から更に進化した人馬一体感を目指した。

その結果，走りのリニアリティが高く，ドライバーの操作とクルマの挙動がシンクロする感覚の高い一体感が実現できたと考える。マツダは今後も，人馬一体の走りの進化を追求していく。

参考文献

(1) 江角ほか：SKYACTIV-G 制御技術の紹介，マツダ技報，No. 29，pp.36-40（2011）
(2) 服部ほか：音からの情報で意のままの運転に貢献するエンジンサウンド開発，マツダ技報，No.37，pp.45-49（2020）

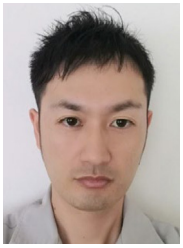
■著　者■

森下 慎也

梅津 大輔

光永 誠介

津田 顕

岡田 光平

服部 之総

特集：MAZDA MX-30

05

MX-30 エレキシフトシステムの開発
Development of Electronic Shifting System for MX-30

木村　隆浩 *1　徳永　幸司 *2　上村　裕樹 *3
Takahiro Kimura　Koji Tokunaga　Hiroki Uemura
岩本　武尊 *4　延河　克明 *5　岡山　裕之 *6
Takeru Iwamoto　Katsuaki Nobukawa　Hiroyuki Okayama

要　約

MX-30 では，『MAZDA PROACTIVE SAFETY』の 3 つの考え方（①認知・判断・操作しやすくする。 ②ミスに気付かせ，正常な状態に戻りやすくする。 ③それでもミスした時は，車がオーバーライドする。）に基づき，操作性と安全性を高次元で両立させることを目指して新しいシフトシステムの開発に取り組んだ。実現手段としてシフトを電子制御化（バイワイヤ化）し，その特長を最大限活用した安全制御を構築することで，操作性と安全性の高次元での両立を図りつつ，『際立つデザイン／意のままの走り』に貢献するエレキシフトシステムを開発した。本稿では，それらの技術紹介を行う。

Abstract

A new shifting system of the Mazda MX-30 was developed based on the “Mazda Proactive Safety” philosophy. With an aim to achieve high levels of shifting performance and safety, the philosophy consists of the three concepts: (1) Easy to recognize, judge and operate; (2) Notify drivers of their mistakes so the drivers can correct them; and (3) If the mistakes are still made, the override system is activated. To accomplish this goal, an electronic shifter was adopted and a safety control system that maximizes the characteristics of the electronic shifter was built, realizing high levels of shifting performance and safety while developing the electronic shifting system that contributes to “outstanding design and precision driving”. This article introduces the technologies employed in the new system.

Key words : Human engineering, Electronics and control, Transmission control, by-wire control, Electronic shift

1. はじめに

マツダが掲げる『MAZDA PROACTIVE SAFETY』（Fig. 1）に定める 3 つの考え方（①認知・判断・操作しやすくする。 ②ミスに気付かせ，正常な状態に戻りやすくする。 ③それでもミスした時は，車がオーバーライドする。）に基づき，安心・安全な状態を作り出すため，電子制御化（バイワイヤ化）したシフトシステムであるエレキシフトシステムを開発し，商品化を実現した。

お客様の日常の運転で，より安心・安全に乗っていただける車にするために，①については，これまでのマツダ車で培ってきたシフト操作性を受け継いだ上で，理想的なシフトの操作性を再定義した。次にそれを実現するシフターの設計に取り組み，同時に MX-30 の特徴的な

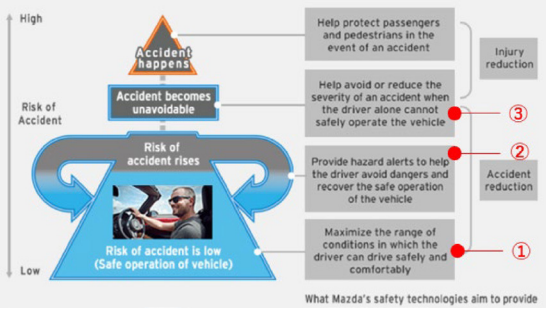


Fig. 1　Mazda Proactive Safety

*1,4　PT 制御システム開発部
PT Control System Development Dept.
*2　シャシー開発部
Chassis Development Dept.
*3　車両実研部
Vehicle Testing & Research Dept.
*5,6　ドライブトレイン開発部
Drivetrain Development Dept.

内装デザインであるフローティングコンソールの実現に貢献した。そして，②と③については，ドライバーが操作ミスしても，安全を確保する制御をシフトの電子制御化を活用して実装した上で，理想的な操作性を織り込んだシフターと適合するメーター表示などを丁寧に作り込んだ。それらを実現した考え方や技術について，説明していく。

2. シフト操作性

2.1　理想のシフト操作性

安心・安全なシフト操作性実現のためには，次の 3 点が備わっていることが重要であると考え，エレキシフトの利点を生かし，「いつでも，誰もが，迷いなく正確に操作できる」ことでシフト操作時でも運転に注力できるように操作性を進化させた。

・現在のポジションの認識
・入れたいポジションの操作方向の認識
・ポジションに入ったことの認識

2.2　シフト方式

シフトの基本機能は，車両を駐車するために静止させる「P」，車両の駆動力を後退方向に伝える「R」，車両の駆動力を遮断する「N」，車両の駆動力を前進方向に伝える「D」の 4 つの機能がある。

シフト操作は通常，ブレーキ操作やステアリング操作との連携で行われる。ブレーキやステアリング操作は足，腕といった大きな筋肉を動かして行われるため，操作時の実感が同じように得られることで「ポジションに入ったことの認識」ができると考えている。よってシフト操作は，ボタンやダイヤルのような指先操作ではなく，腕全体を動かして操作時の実感が得られる従来方式のレバータイプを選定した。

その上で，MX-30 のシフターは「現在のポジションの認識」と「ポジションに入ったことの認識」が容易な，従来の AT シフターと同様に P-R-N-D のシフトポジションに応じてレバー位置が固定されるステーショナリー式とした。

Fig. 2 は狭い路地で焦って D → R，R → D 操作を繰り返し U ターンを行う状況を設定して，シフト完了から手を放すまでの平均時間を，レバーが固定されるステーショナリー式とレバーが基準位置に戻るモーメンタリー式で比較したものである。ステーショナリー式には P-R-N-D のあるポジションから別のポジションに切り替える際の操作力に節度があるものを，モーメンタリー式にはそのような節度がないものを用いた。その結果，7 名中 6 名でステーショナリー式の方が手を放す時間が短くなっている。これはポジションが変わる際に操作力に節度があり，その節度をユーザーが自身の操作に連動したフィードバックとして，腕を通して感じられることで「ポジションに入ったことの認識」がしやすいことを示している。

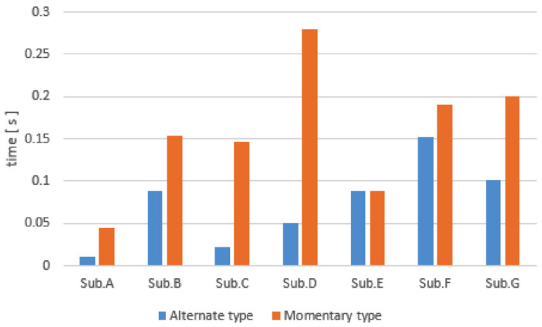


Fig. 2　Time from the Completion of Shift to the Release of Their Hand

更にドライバーの認知，判断，操作をしやすくするために，シフトパターンは前進⇔後退を前後操作，発進⇔停止を左右操作という，一機能，一方向，かつ，突き当て操作とすることで，確実に操作できるようにし，P ポジションは R ポジションの横で運転席側とした（Fig. 3）。P ポジションを運転席側としたのは，人は腕を前側に動かす際，身体を基準に外に向かう方向に力が出やすい特性をもっており，D → R 操作時に誤って P に入ってしまう誤操作を防止するためである。特に駐車場で車を出し入れする上で前進⇔後退を繰り返すシーンで有効と考えている。

MX-30 では，車両の駐車／前進／後退の安全上重要な操作を突き当て操作により，確実に認知できるようにした操作性の進化に加えて，従来のメーター内へのポジション表示・シフター横のポジション表示・R ポジションでのチャイムにより，視覚・聴覚機能を合わせることで「現在のポジションの認識」，「入れたいポジションの操作方向の認識」，「ポジションに入ったことの認識」を向上させている。

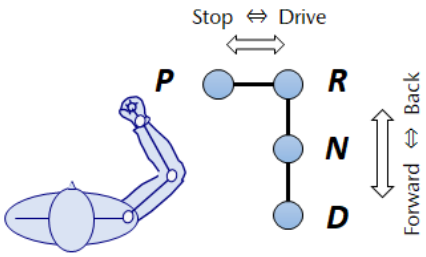


Fig. 3　Shift Pattern

2.3　シフター配置とシフト操作特性

（1）シフター配置

シフターの配置は，小柄な方から大柄な方まで操作時にシートから肩をずらすことなく操作できる状態を目指した。

楽に操作できる姿勢として，体から遠い側は腕を伸ばした状態から肘を数十度曲げた状態，近い側は肩から肘が垂直までの範囲とした。Fig. 4 は小柄な方の体から近い側の限界と，大柄な方の遠い側の限界を示したもので，それらの間が誰もが楽にシフターを操作できる配置エリアとなる。

MX-30 では，P ポジションを含む全てのシフトポジションがこの範囲に入るようにシフターを配置している。

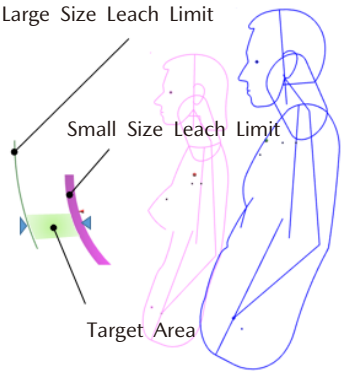


Fig. 4　Driving Position Requirements Area (Image)

（2）操作特性のねらい

P ポジションを含む全てのシフトポジションを誰もが楽に操作できるエリア内に入れるためには，従来のシフターよりもショートストローク化が必要となる。「確実な操作実感」と「楽に操作できる荷重特性」をショートストロークで実現するための新たな要件を導き出した。新たな要件は以下のとおり。

- 安全にかつ滑らかな P ⇔ R の横方向操作を可能にするピーク荷重
- シフトポジションの切り替わりを認知できる最小ストローク量と R-N-D 操作における荷重ピーク点からの荷重低下率：△B/△P（Fig. 5）
- シフト操作が完了したことのフィードバックを掌に柔らかく返すストッパー特性（Fig. 6）

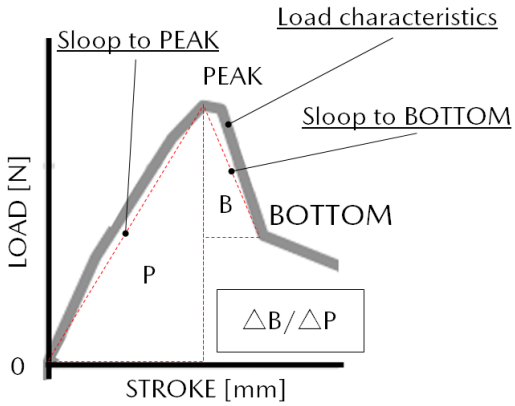


Fig. 5　Switching Load Characteristics

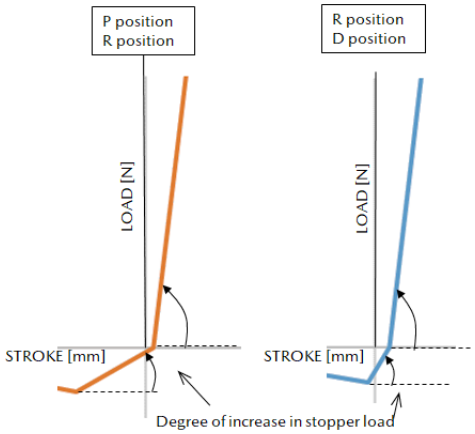


Fig. 6　Load Characteristics of the Stopper

これらの要件を従来の要件に加え，目標操作特性を決定した（Fig. 7）。

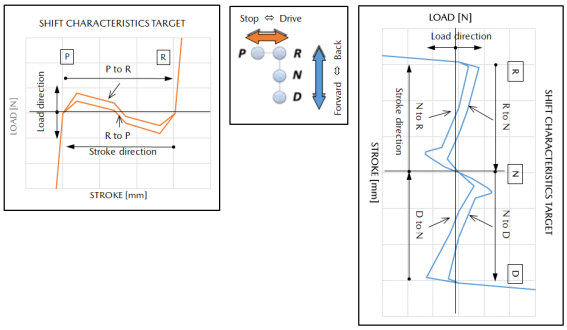


Fig. 7　Shift Pattern and Operating Characteristics (LHD)

ドライバーのポジション切り替えの意を感じたと同時に，吸い込んで優しく受け止める，このマツダらしい操作感を目標に掲げ，シフター開発に取り組んだ。

3. シフター

3.1　操作システム構成の変更に伴う逆 L 字型シフトパターンとねらいの操作特性の実現

（1）逆 L 字のシフトパターンを実現する機能配分

従来の機械式シフトでは，ストローク方向変換のためのリンク機構が必要であり，逆 L 字のシフトパターン実現には構造が複雑となるため不向きである。

一方，エレキシフトではシフターの物理的な操作位置をセンサーで検知し，電子制御で取り扱うことが可能な電気信号に変換して出力する（Fig. 8）。これにより，機械的な接続の制約から解放され，Fig. 3 で示す逆 L 字型のシフトパターンを実現した。

（2）ねらいの操作特性を実現する機能配分

従来の機械式シフトで機能配分すると以下の制約がある。

- トランスアクスル側のシフトポジション切り替えに必要なストローク
- 意図しない外力などでシフトポジションが切り替わ

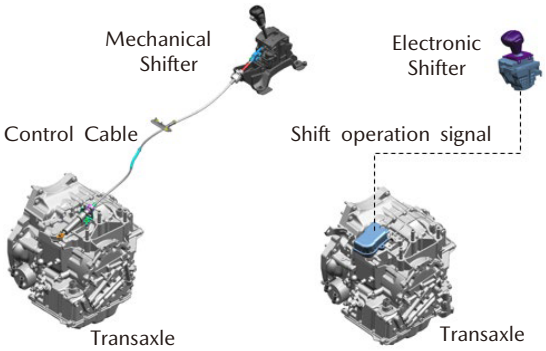


Fig. 8　Mechanical and Electronic Shift System

らないようにするための予荷重
・チェンジケーブルの荷重伝達ロス
一方，エレキシフトはトランスアクスルと繋ぐケーブルがないため上記制約から解放される（Fig. 9）。エレキシフトでの機能配分により，ねらいの操作特性を実現した。

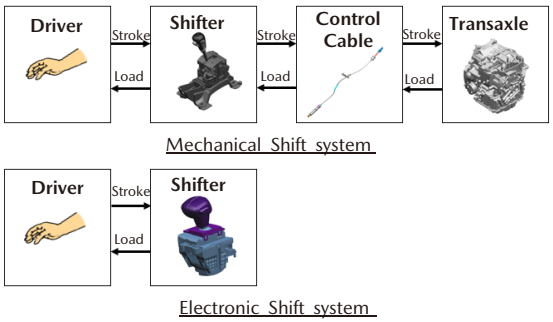


Fig. 9　Operating Characteristics Generating Function

3.2　シフター設計

構造制約から解放され，シフターの設計自由度が高くなるエレキシフト化によるメリットを生かし，逆 L 字のシフトパターンとねらいの操作特性を省スペースで実現した（Fig. 10）。

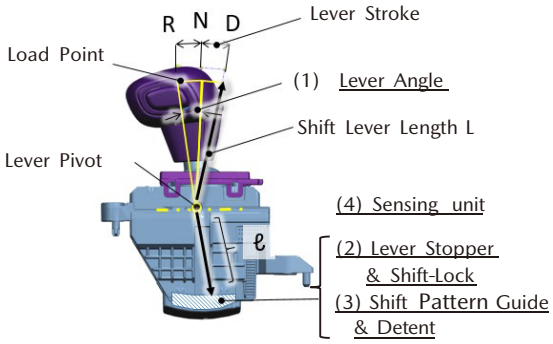


Fig. 10　Structure Summary of the Shifter（Side View）

(1) シフトレバー作動角
ショートストロークでありながら，操作したポジションに入ったことを認識しやすくするためには，シフトレバーの作動角が重要である。シフトレバーの傾きの変化を感じやすい作動角を導き出し，シフターの設計に反映した。
(2) シフトレバー比
シフトレバーの支点からシフトノブ荷重点までの距離（シフトレバー長さ）L と，同支点から操作特性を発生する機構やストッパー部までの距離 ℓ のふたつの距離の比を従来の機械式シフトと比べて小さく設計（低レバー比化）し，最適化した。これにより，機構部における部品同士の隙間によるガタつきをシフトノブ上では感じ難く，剛性感は高く感じるよう設計した。
(3) ディテント・ストッパー
(2)で説明した低レバー比化によって，ディテント部に負荷される荷重を小さくできる。これにより操作特性を発生する機構とシフトパターンを作り出すゲート機構，及びストッパーを統合することができ，ねらいの操作特性と逆 L 字型のシフトパターンを備えたシフターをコンパクトに設計した。
(4) ポジション検出
内部機構の作動量を大きく設計し，少ないセンサー数で操作位置検出を行えるように設計した。
ショートストロークかつ小型化したシフターと，従来の機械式シフトシステムで必要なケーブルやリンク機構の廃止に伴うコンソール周辺の省スペース化により，空間の占有率を従来の機械シフトと比べ 70%削減した。これによりフローティングコンソール実現に貢献した。

4. エレキシフト制御システム

4.1　制御システム構成

今回開発したエレキシフトの制御システム構成を説明する。主に以下の 3 つのデバイスを搭載することで，シフトシステムを電子制御化（シフトバイワイヤ化）した。
① Electronic Shifter
シフター内部には ECU と，ドライバーが操作したレバー位置を検出するポジションセンサーを搭載している。ECU がそのセンサー信号を読み取り，シフト操作信号として，CAN 通信で他の ECU へ送信する。
② PCM（Powertrain Control Module）
Electronic Shifter からのシフト操作信号，ドライバーによる関係する操作及び車速など車両状態に応じて，シフトポジション切り替え可否を判断する。その判断に基づいて，シフト切り替え指示信号を EPL へ送信する。また，現在のシフトポジション位置などの情報を他の ECU へ送信する。
③ EPL（Electric Parking Lock）
トランスアクスルのシフトポジションを切り替える電動アクチュエータ及びその制御 ECU。PCM からのシフト切り替え指示信号に基づいて，アクチュエータを駆動し，その結果としてのトランスアクスルのシフトポジションを CAN 通信で PCM へ送信する。

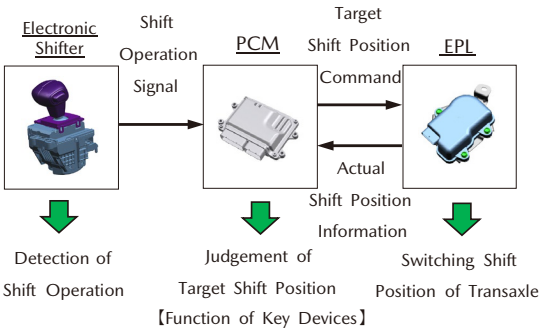
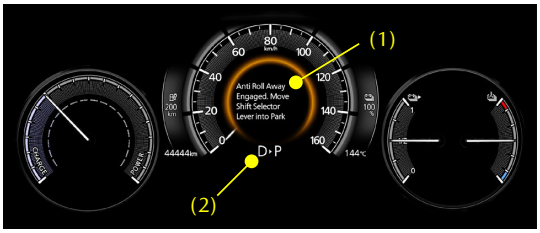


Fig. 11　Key Devices of Electronic Shift System

4.2　安全機能と HMI（Human Machine Interface）

「MAZDA PROACTIVE SAFETY」における 3 つの考え方のうち，“②ミスに気付かせ，正常な状態に戻りやすくする”，“③それでもミスした時，車がオーバーライドする”の 2 つに基づき，制御機能及び HMI を設計した。この例として，以下に MX-30 へ実装した「オート P（パーキングロック）機能」を紹介する。

まず，オート P 機能とは，ドライバーが車両を駐車する際にシフトポジションを P に切り替え操作するのを忘れたまま，車両を降りてしまうようなシーンにおいて，意図しない車の動き出し防止を目的とし，自動的にシフトポジションを P（パーキング）へ切り替える機能である。例えば，シフトポジションが D（ドライブ）の状態で，ドライバーの降車意図（電源ポジション OFF 操作，運転席シートベルト解除かつドアを開ける操作）を検出した場合，Fig. 12 に示すメッセージをメーター内のマルチインフォメーションディスプレーに警告チャイムとともに表示し，シフトポジション P への切り替えを自動的に実行する。これらにより，ドライバーに “ミスに気付かせると同時に”，“車がオーバーライドする” ことで安全性を向上している。この時，シフターのレバー位置とトランスアクスルの実際のシフトポジションにアンマッチが生じるが，Fig. 12 で示したメッセージと「シフト誘導表示」をメーター内に表示し，ドライバーに注意を促す。



(1) Message　(2) Shift Guide Indication

Fig. 12　AUTO P Function in Operation

4.3　他システム ECU との協調制御

MX-30 のエレキシフトシステムでは，操作性にこだわったステーショナリー式のシフターと，バイワイヤ化により実装可能となったオート P 機能などを両立すべく，それをサポートする HMI として，4.2 で紹介した表示やチャイム鳴動を実現する必要があった。オート P 機能や表示やチャイムの制御は，PCM を中心に，BCM（Body Control Module）や HEC（Hybrid Electronic Cluster）など，車両内の他の制御を担う多数の ECU との協調制御を織り込むことで実現している（Fig. 13）。

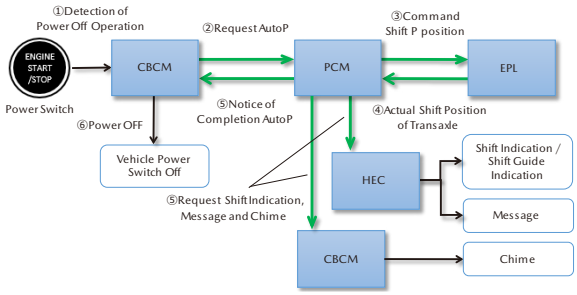


Fig. 13　Block Diagram for AUTO P Function

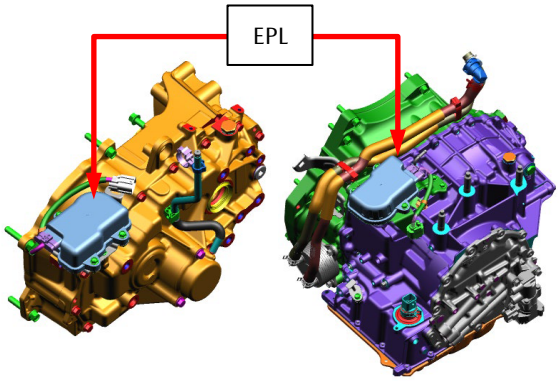
4.4　異なるパワートレインに対応するシステム設計

MX-30 は，複数種類のパワートレインを搭載する車両として企画，開発した。EV モデルとマイルドハイブリッドモデルでは，搭載するトランスアクスルが異なる（Fig. 14）が，開発したシステムではいずれのモデルに対しても，共通のシステム構成及び部品で，エレキシフト化を実現した。開発初期にあらかじめ，固定と変動領域を定義してシステム設計しておき，変動領域についてはソフトウェア仕様を変更することで，各モデルの作り分けを実現した。

【固定領域の例】4.1 で述べた主要デバイスである Electronic Shifter-PCM-EPL の構成や，やり取りする信号などのインターフェースは，EV モデルとマイルドハイブリッドモデルで共通としている。また，PCM を中心として実装したオート P 機能や HMI の制御インターフェース，CAN 通信のバス構成も共通仕様で設計した。

【変動領域の例】EV モデルとマイルドハイブリッドモデルのトランスアクスルでは，内部のシフト切り替えに関するハードウェア機構が異なる。EPL にシフト切り替え指示信号を送信する PCM ソフトウェアと，EPL のアクチュエータ制御ソフトウェアの仕様を作り分けることで機構の違いを吸収した。

以上のように，EV モデルとマイルドハイブリッドモデルでエレキシフトシステムの仕様差を最小限に留めるよう，設計的に工夫したことで，品質の確かな作り込みと短期開発を実現し，両モデルへのエレキシフトの同時搭載を実現した。



EV-MODEL　　Mild Hybrid Model

Fig. 14　Transaxle and EPL（Electric Parking Lock）

4.5　制御システム及び制御の機能検証

MX-30 のエレキシフトシステムでは，ステーショナリー式のシフターを採用していることから，オート P 機能作動時など，シフトレバーの位置とトランスアクスルのシフトポジションがアンマッチとなる場合がある。そのため，その状態とそれらの制御における状態遷移が通常よりも多くなっている。状態遷移をモデル化した上で，MILS（Model In the Loop Simulator）環境を活用したシミュレーション[(1)] で制御ソフトウェアの動作を検証することで，制御ロジックを作り込んでいる。このようにして作成したソフトウェアを PCM に実装し，開発試作車で意図どおりの機能が実現できていることを最終確認している。効率的な開発の実現を目指して，マツダが従来から培ってきた MBD（Model Based Development）を活用した機能検証を通して，安心・安全を提供する車両のシステム及び制御の確かな品質を作り込んでいる。

5. おわりに

MX-30 向けに新開発したエレキシフトシステムの技術紹介を行った。本システムは，パワートレイン本体系，車両シャシー系，制御系設計及び関連実研など，多数の開発部門の連携と協力によって，商品化を実現した。今後もお客様が「安心・安全」にお乗りいただける車両を提供すべく，マツダの開発部門が保有する技術力を継続して磨き，それらを結集させながら，新技術・新機能の開発に邁進する所存である。

参考文献

(1) 臼田ほか：SKYACTIV の MBD 検証環境について，マツダ技報，No.31，pp.48-53（2013）

■著　者■

木村 隆浩

徳永 幸司

上村 裕樹

岩本 武尊

延河 克明

岡山 裕之

特集：MAZDA MX-30

06

BEV のバッテリーを使い切る技術
Maximizing Battery Performance for BEVs

橋坂　明 *1　若山　敬平 *2　江角　圭太郎 *3
Akira Hashizaka　Norihira Wakayama　Keitaro Ezumi
田中　健治 *4　塚本　直樹 *5　岡田　光平 *6
Kenji Tanaka　Naoki Tsukamoto　Kohei Okada

要　約

一般的に，BEV 用の駆動用バッテリーの入出力可能電力は温度や充電状態に大きく依存するため，駆動用モーターの出力や回生発電量が減少し，走りの魅力や航続可能距離に影響が出る。MX-30 EV MODEL では，「入出力可能電力を余すことなく使う」，「入出力可能電力を安定させる」，「入出力可能電力が低い状態を補う」の 3 つの観点で，厳しい温度・充電状態でもバッテリーのポテンシャルを可能な限り使うための要素技術群を開発した。これにより，マツダが目指す人馬一体の走りと，実用的な航続可能距離を確保することができた。本稿では，MX-30 EV MODEL の電気駆動システムの紹介とともに，この要素技術群である「バッテリーを使い切る技術」について解説する。

Abstract

The inputtable and outputtable power of batteries for BEVs, in general, largely depends on the temperature and charging state; therefore, output power of drive motor and input power of regeneration may decrease, which affects driving performance and cruising range. We have developed elemental technologies to use up potential performance of batteries as much as possible even in sever temperature and charging state through the MX-30 EV Model. The technologies were developed from the three perspectives of “using up inputtble and outputtable power”, “stabilizing inputtble and outputtable power” and “compensating for the low power state”. As a result, the technologies contribute to Mazda’s concept of “Jinba Ittai” and the practical cruising range of the MX-30 EV Model. We explain, in this paper, the electric drive system of the MX-30 EV Model and the elemental technologies, “Maximizing Battery Performance for BEVs”.

Key words : EV and HV system, Energy control system, Energy management, Battery technology

1. はじめに

MX-30 EV MODEL（以下 MX-30）では，BEV ならではの駆動力のつながり感・応答の自由度を活かし，マツダの目指す人馬一体の考え方を実現している。具体的には，エレクトリック G-ベクタリング コントロール プラス（e-GVC Plus）やステアリングホイールパドル，モーターペダルといった走る歓びを加速させる新機能を採用し，走りの魅力品質を進化させた（詳細は別稿参照）。また，駆動用バッテリーの容量は 35.5kWh とし，LCA（ライフサイクルアセスメント）による CO_2 排出量を抑えつつ，買い物や通勤など日常生活でのお客様の実用的な使用環境に見合った航続可能距離を確保している。

一方，BEV のパワーソースは基本的には駆動用バッテリーのみである。駆動用バッテリーの入出力可能電力は温度や充電状態などにより制限されるため，走りの魅力品質や航続可能距離に影響がある。そこで，MX-30 では，さまざまな温度・充電状態でバッテリーの入出力性能を引き出すための電気駆動システムならではの要素技術群を採用し，走りの魅力品質を確保すると同時に，限られたバッテリー容量で実用的な航続可能距離を確保した。本稿では，この要素技術群である「バッテリーを使い切る技術」について解説する。

*1〜3　PT 制御システム開発部
PT Control System Development Dept.
*4〜6　走行・環境性能開発部
Driveability & Environmental Performance Development Dept.

2. 電気駆動システム構成

2.1　ハードウェア構成

Fig. 1 に MX-30 の電気駆動システムの構成を示す。駆動用モーターは永久磁石同期モーターであり，減速機を介してドライブシャフトへ接続される。リチウムイオン電池で構成される駆動用バッテリーからの直流電流はインバーターにより三相交流電流に変換され，駆動用モーターにより走行する。減速時はブレーキユニットと協調しながらモーターで発電をおこない，減速エネルギーを電力に変換して駆動用バッテリーに蓄える（協調回生）。DC/DC コンバーターは高電圧を 12V に降圧することで，ヘッドライトや各コントローラーなどの 12V で作動する補機への電力供給をおこなう。電動空調システムはコンプレッサー（ヒートポンプ）と PTC ヒーターで構成され，駆動用バッテリーから電力が供給される。

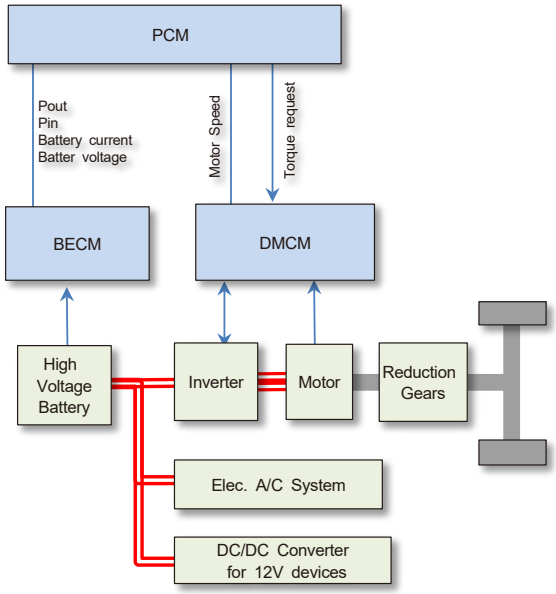


Fig. 1　Schematic Diagram of MX-30 Electric Drive System

2.2　コントローラー構成

MX-30 は，駆動用バッテリーや駆動用モーターといった個別ユニットごとにコントローラーを設け，各ユニット状態をモニターし，制御している。同時に，Powertrain Control Module（PCM）が，それら個別ユニットと協調し，全ての電気駆動システムの動作を統合制御している。

Battery Energy Control Module（BECM）は，バッテリー充電量や温度などの状態を把握し，バッテリーを保護するための入出力可能電力を演算し，これら情報を PCM に送信している。

Drive Motor Control Module（DMCM）は，PCM が送信する要求モータートルクの実現を担う。駆動用バッテリーからの直流電圧を交流に変換し，走行に必要な電力を駆動用モーターに供給している。また，コイル等各部温度やモーター回転数などの状態を把握し，これら情報を PCM に送信している。

PCM は，ドライバーの意図どおりに車両を駆動・減速させるため，BECM や DMCM からの情報と運転者のシフトレバー操作やアクセル操作を統合的に判断し，駆動用モーターのトルクをコントロールしている。

2.3　制御機能と要素技術

PCM を中心とした電気駆動システムは多くの機能をもっており，それらは種々の要素技術によって実現している。Fig. 2 に，要素技術のイメージを示す。

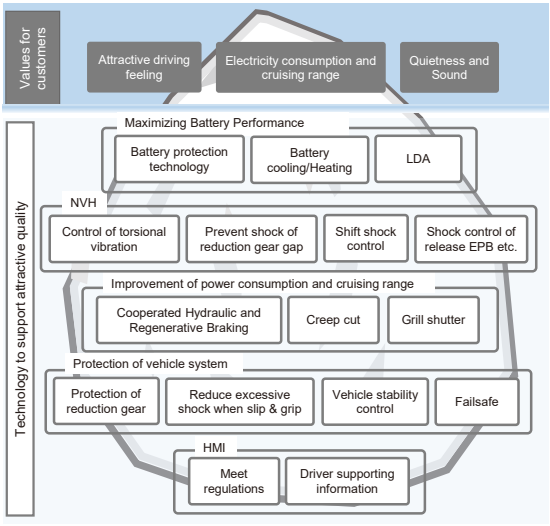


Fig. 2　The Iceberg Structure of Electric-Driving Technologies

例えば，システム保護ではモーターインバーターの冷却や，駆動輪がスリップ状態から復帰する際の衝撃を緩和する。電費（電力消費率）・航続可能距離の向上では，空気抵抗を低減するグリルシャッタなどを採用した。クリープカットはブレーキペダルを踏んで停車している際，クリープトルクをゼロとして電力消費を抑えるものだが，クリープ復帰時にはショックを発生させない制御技術が必要となる。また，本稿の主題である「バッテリーを使い切る技術」もこれら要素技術の一つである。要素技術に支えられ，走りの魅力品質や優れた電力消費率などの性能を提供している。

3. バッテリーを使い切る技術

3.1　バッテリーを使い切る意義

エンジンとバッテリーの 2 つのパワーソースをもつハイブリッド車とは異なり，BEV では駆動用バッテリーが唯一のパワーソースである。そのため，走りの魅力品質を安定的に得るには，温度や充電状態によって変化しないバッテリー出力性能が必要である。また，減速エネルギーを無駄なく回生し，電費を向上するためにも，安定

したバッテリー入力性能が必要である。

しかしながら，一般的な駆動用バッテリーにおいては，寿命や信頼性確保ための入出力可能電力が設定されている。Fig. 3 にリチウムイオン電池の出力可能電力の傾向を示す。SOC はバッテリーの充電状態を示し，残充電容量が大きいほど SOC は高くなる。一般的に低温（氷点下）や低 SOC での出力可能電力は，駆動力（走り）にとって満足のいくものにない。また，入力可能電力については，低温や高 SOC で低くなり，減速回生の機会と電力量が減る。

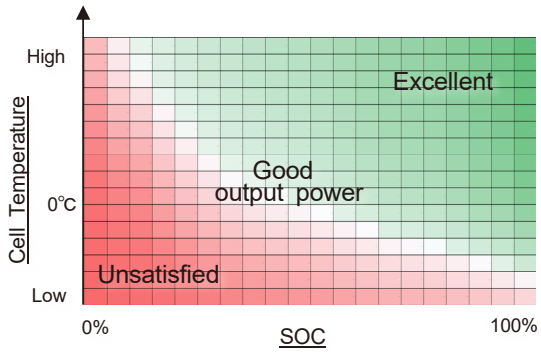


Fig. 3　Dependency of Outputtable Power of Li-Ion Batteries on Cell Temperature and SOC

既存のリチウムイオン電池の性能向上をはじめ，全固体電池などの新型電池開発といった取り組みがされているが，満足のいく入出力特性をもつバッテリーの実現には時間を要すると考える[(1)(2)]。一方で，BEV の普及は喫急の課題であり，バッテリーの進化を待てない。そこで，MX-30 では既存のバッテリーのポテンシャルを最大限に使い切る技術，すなわち，

・入出力可能電力をマージンなく使い切る技術
・温度管理などにより入出力可能電力を安定させる技術
・入出力可能電力の低下を適切に補う技術

を作り込んだ。これら技術により，低温や低 SOC での駆動力を確保するとともに、回生量の減少も最低限に抑えた。Fig. 4 に，バッテリーの使い切り技術の概念を示す。

3.2　入出力可能電力を守る制御

Fig. 5 に，走行中の駆動用バッテリーの使い方のイメージを示す。DC/DC コンバーターでは一定以上の電力が消費され，空調作動時は電動空調システムでも一定以上の電力が使用される。モーターインバーターへの電力は運転者の要求駆動力に応じて増減するが，出力可能電力が十分にない場合，駆動力を制限しないと，駆動用バッテリーの出力可能電力を越えてしまう。駆動用バッテリー自身は入出力を制限することはできないため，モーターインバーターなどの負荷側の消費電力を制御することで，入出力可能電力を守る必要がある。

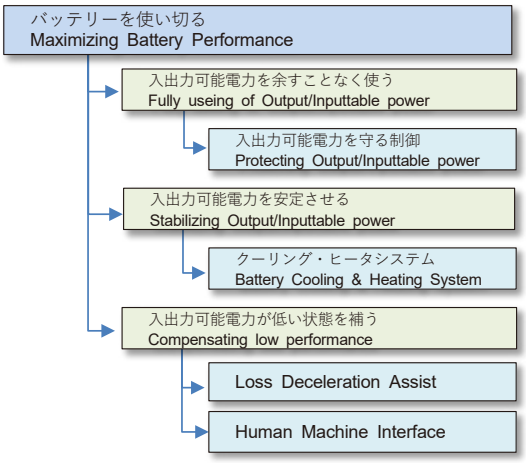


Fig. 4　Tree Diagram of Maximizing Battery Performance Technologies

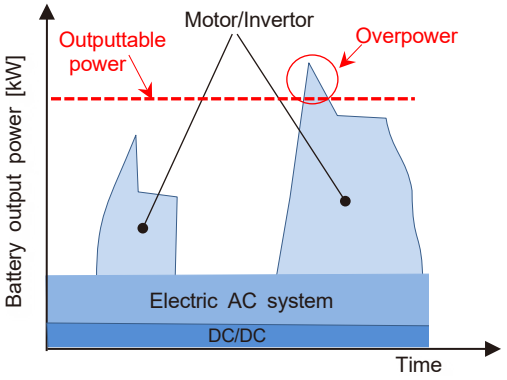


Fig. 5　Time-Chart of Battery Power Use

減速においては，モーターインバーターで減速回生を行うため，電動空調システムと DC/DC コンバーターの消費電力を差し引いた回生電力がバッテリーに入力される。出力側と同様，モーターインバーターの電力マネジメントを行わないと，入力可能電力を超えるケースがある。

Fig. 2 に示したように，BECM は入出力可能電力（P_{in}，P_{out}）をリアルタイムで演算し，PCM に送信する。PCM は，バッテリー電流・電圧やモーター速度等の情報を受信し，P_{in} と P_{out} を守るように DMCM にモータートルク出力を指令する。

バッテリー出力電力はモーターが力行運転の場合，（1）式となる。

$$P_{bat}=T_m \cdot N_m / \eta_{mot}+P_{dcdc}+P_{ac} \quad (1)$$

P_{bat}：駆動用バッテリー出力［kW］
T_{mot}：モーター軸トルク［N・m］
N_{mot}：モーター速度［rad/sec］
η_{mot}：モーターインバーター総合効率［-］
P_{dcdc}：DC/DC コンバーター消費電力［kW］
P_{ac}：電動エアコンシステム消費電力［kW］

MX-30 では，N_{mot} は車速に依存するため，T_{mot} を（2）式

のとおりに制限することで，P_{bat} を P_{out} 以下にすることができる。

$$T_{mot} \leqq (P_{out} - P_{dcdc} - P_{ac}) \cdot \eta_{mot} / N_{mot} \quad (2)$$

ここで，η_{mot} を得るにはあらかじめ PCM に実装しておいたマップを参照する手法が簡便である。ただし，η_{mot} はモーターインバーター内部の温度の依存性や，個体バラツキをもつ。そのため，マップにより η_{mot} を得るオープンループ制御のみで，P_{out} を逸脱しないようにするには，誤差を考慮したマージンを確保して T_{mot} を制限する必要がある。

Fig. 6 に，マージンを確保した制御で，アクセル開度全開で加減速を繰り返した際の P_{bat} と P_{out} の挙動を示す。モータートルクは正値が駆動，負値が回生を示し，P_{bat} と P_{out} は正値が充電（入力），負値が放電（出力）を表している。加速時に P_{bat} は低下（バッテリ出力が増加）しているが，P_{out} を超えることはない。しかしながら，P_{out} に対して大きなマージンが確保されており，P_{out} を使い切れていないことが分かる。

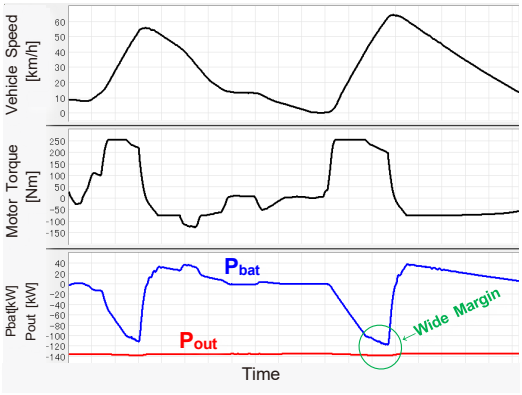


Fig. 6　Comparison of P_{bat} and P_{out} without Feed Back Control

そこで，P_{bat} を観測し，（3）式により η_{mot} をリアルタイムに演算し，T_{mot} を制限するフィードバック要素を取り入れた。

$$\eta_{mot} = T_{mot} / (P_{bat} - P_{dcdc} - P_{ac}) \cdot N_{mot} \quad (3)$$

（3）式右辺の分子，もしくは分母が 0 近傍になる場合や過渡時においては，η_{mot} の誤差は大きくなる傾向がある。また，P_{dcdc} などの観測値の誤差も無視できない。そのため，本制御ではカルマンフィルターによる η_{mot} の精度向上を行っている。

Fig. 7 に，フィードバック制御を実施した際の実際の挙動を示す。ここで，モーター内部の温度を氷点下に保ち，η_{mot} の誤差を生じやすいようにした。加速時に P_{bat} が低下（バッテリー出力が増加）するが，モータートルクを適切に制限することで，P_{bat} が P_{out} を超えることなく，ほぼ重なっていることが分かる。つまり，P_{out} を余すことなく，ほぼ使い切った走行ができている。

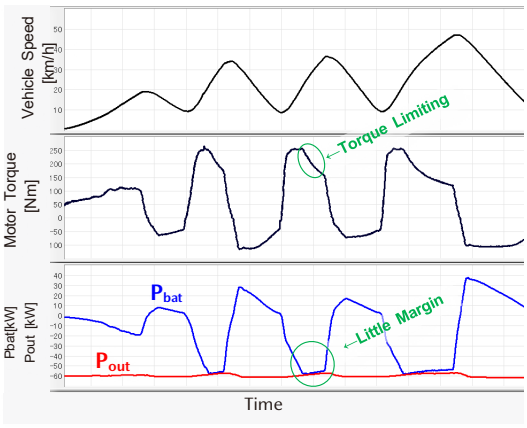


Fig. 7　Comparison of P_{bat} and P_{out} with Feedback Control （Kalman-Filter）

3.3　バッテリークーリング・ヒーターシステム

MX-30 では，入出力可能電力を良い状態に保つため，空調システムの冷媒を用いたクーリングシステムを構築した。Fig. 8 にシステムの概要を示す。空調システムは，冷房と暖房の双方に使用可能なヒートポンプシステムを採用している。駆動用バッテリーを構成する各バッテリーモジュールには，冷媒との熱抵抗が最小になるように冷媒の流路を設置し，バッテリーが高温になった時のみ，バッテリークーリング用の膨張弁を開き冷媒をバッテリー側にも流している。

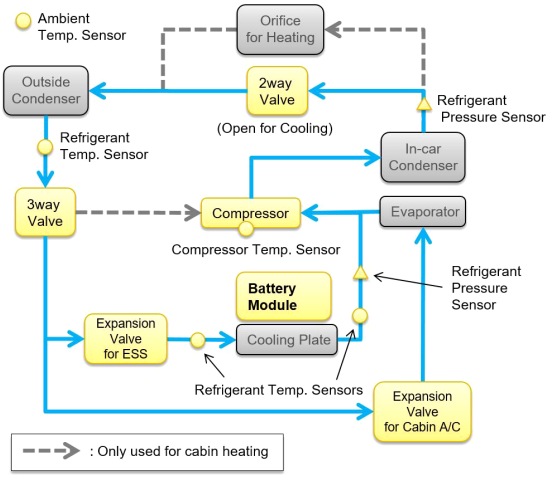


Fig. 8　Schematic Diagram of Cooling System for the Battery Module

このクーリングシステムの課題は空調と冷却の両立である。外部充電中も積極的に冷却を実施することで，走行開始時に温度が低い状態を作り出し，走行中の冷却の頻度を抑制している。また，走行中に冷却が必要となった場合も，走りの魅力を失わない範囲で走行性能の低下

を許容し，空調との両立を図っている。

入出力可能電力はバッテリーの劣化が進んだ場合も減少する。MX-30 では，走行を終了して駐車する際にバッテリー温度が高い場合は，駐車中の冷却も可能にしている（実施可否は選択可能）。これにより，高温状態での放置の頻度を下げ劣化を抑えている。

低外気温下でも出力可能電力を確保するために，バッテリーヒーターを搭載した。バッテリー温度が一定以下になった際，ヒーターに通電することで温度降下を防ぎ，走行性能の低下を抑制する。一方で，駐車中にヒーターを作動させると，SOC の低下が懸念される。そこで，運転者がヒーターの作動の許可／禁止を選択できるようにし，航続可能距離と走りのバランスを調整できるようにした。なお，バッテリーヒーターは低外気温下での充電時間の短縮にも貢献している。

3.4　Loss Deceleration Assist

MX-30 では，走行中にアクセルオフした時，モーターでの回生（発電）により通常のガソリン車のエンジンブレーキと同様の減速力を発生させている（アクセルオフ回生）。また，ブレーキペダルの踏み込み時は，摩擦ブレーキと回生ブレーキが連動する協調回生ブレーキを採用している。

アクセルオフ回生においては，満充電等でバッテリー入力可能電力が低下する場合，狙いの減速力が発生させられない。そこで，入力可能電力が低い状態を補うため，アクセルオフ回生が低下する状態であっても，ブレーキユニットと協調し摩擦ブレーキを補助的に作動させ，減速中の安心感を得るのに必要な減速力を確保させている。このシステムを「Loss Deceleration Assist（LDA）」と呼ぶ。

Fig. 9 に，Loss Deceleration Assist の動作のイメージ示す。ブレーキとアクセルペダルの両方を離して，坂を下り続けるシーンである。最初はアクセルオフ回生を実施しているが，SOC の上昇につれて入力可能電力が減少するため，アクセルオフ回生による減速感が目減りする。そこで，摩擦ブレーキを作動させ，目減り分を補填している。最終的には回生が全くできなくなるが，摩擦ブレーキのみで最低限の減速度を確保する。

3.5　Human Machine Interface

他にも入出力可能電力の低下を補う技術として，Human Machine Interface（HMI）を用いて，出力可能電力が低下した際，運転者が駆動力への影響をリアルタイムで把握できるようにしている。Fig. 10 にパワーメーターの外観を示す。出力可能な最大パワーをゲージ（セグメント）で表示し，実際のモーター出力を針で示すようにした。運転者は現在の出力と最大パワーとの差分を直感的に把握することでき，追い抜きなどで適切なアクセル操作が可能となる。

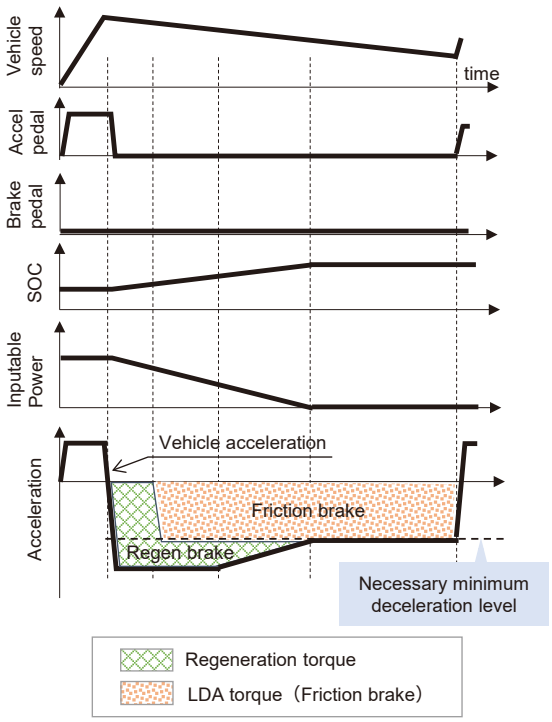


Fig. 9　The Time-Chart of Loss Deceleration Assist

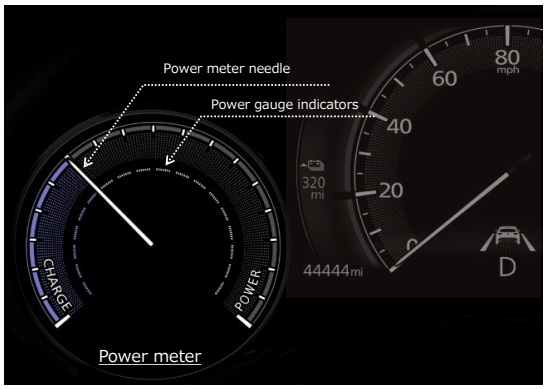


Fig. 10　Power Meter of MX-30 EV MODEL

4. おわりに

マツダではプレマシーハイドロジェン RE ハイブリッド[3][4]，デミオ BEV[5] といった電気駆動車を継続的に開発しており，蓄積してきた基盤となる要素技術を基に MX-30 EV MODEL を提供することができた。今後も，更に魅力的な電気駆動車を提供していくため，走る歓びを実現する機能とともに電気駆動システム要素技術も進化させていく。

参考文献

（1）石黒恭生：次世代電池：ノーベル賞受賞液系リチウムイオン電池を将来へ繋ぐ全固体電池開発，学術の動向，Vol.25, No.2, pp.26-32（2020）
（2）国立研究開発法人新エネルギー産業技術総合開発機構：「革新型蓄電池実用化促進基盤技術開発」基本

計画
(3) N. WAKAYAMA: Development of Premacy Hydrogen RE Hybrid, 31th International Vienna Motor Symposium, Vol.716-2, No.14 (2010)
(4) 若山敬平ほか：ハイドロジェンRE ハイブリッドシステムの開発，マツダ技報，No.27, pp.31-35 (2009)
(5) 福庭一志ほか：デミオ EV の制御開発，マツダ技報，No.30, pp.130-134（2012）

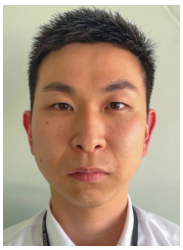
■著　者■

橋坂 明

若山 敬平

江角 圭太郎

田中 健治


塚本 直樹

岡田 光平

特集：MAZDA MX-30

07

MX-30 EV MODEL への MBD の適用
Application of Model Base Development to MX-30 EV Model

三戸　秀樹 *1　北川　浩之 *2　鴫濱　真悟 *3
Hideki Mito　Hiroyuki Kitagawa　Shingo Shigihama
明神　未季 *4　田中　大介 *5
Miki Myojin　Daisuke Tanaka

要　約

ZEV（Zero Emission Vehicle）規制を筆頭に環境規制への適合による開発ボリュームの増加は，開発期間をどれだけ短縮化できるかがキーである。MX-30 EV MODEL（以下，MX-30）は，マツダ初の量産電気自動車（Battery Electric Vehicle，以下 BEV）として従来の ICE（Internal Combustion Engine）車にはないモーター（駆動）制御系／バッテリー（エネルギー）制御系を搭載し，各高電圧コンポーネントを協調させた機能を実現するパワートレインシステム（以下，PT システム）を新規開発した。

今回，MX-30 では，制御システムが多重通信（Controller Area Network，以下，CAN）中心のシステム構成に変わることで，検証環境や開発のプロセスの視点を変更する必要がある。BEV 特有の課題に対して，効率よく開発する手段としてマツダが強みとしている MBD（Model Based Development）の既存開発環境をベースに仕様変更することで，開発期間の短縮化を実現した。

Abstract

As the demand for the compliance with environmental regulations such as ZEV regulation grows, shortening development time (up to development completion) is essential. MX-30 EV Model (MX-30), Mazda's first Battery Electric Vehicle (BEV), is equipped with motor (driving)-/battery (energy)-control systems that are not found in conventional gasoline-powered cars, and with the newly-developed power train system (PT system) that functions as a combination of each high voltage component.

As the control system configuration of the MX-30 is renewed to center on Controller Area Network (CAN), the viewpoints of the inspection-environment process and development process have to be changed. For BEV-specific issues, we have revised the specifications of development environment for the change-points based on the MBD's existing development environment, successfully achieving shorter development time.

Key words : Battery Electric Vehicle, High voltage component, Controller Area Network, MBD, Shorter development time

1. はじめに

世界的な環境意識の高まりによる排ガス規制強化の流れは，ZEV＝BEV の導入義務付けや優遇政策を加速させている。

マツダは「走る歓び」と「優れた環境・安全性能」を高い次元で両立させた商品を提供すべく，多彩な PT システムによるクルマ全体での低燃費化に挑戦し続けており，差別化を図った特色のある魅力的な電動車の早期市場導入が必要な状況である。

今回，電動デバイスのみで走行する電気自動車の開発において，ICE を搭載する車両の PT 制御システム開発で培った MBD をベースに BEV 特有の課題への対策，及び効率的な改善を実施したので紹介する。

2. BEV のシステム概要と開発課題

2.1　BEV の制御システム概要

今回開発した BEV は，PCM（Powertrain Control Module）を統合コントローラーとして，高電圧ラインに接続されるコンポーネント（以下，高電圧コンポーネント）や従来の PT システムのユニットと協調制御を行うシステム構成とした。

ICE システムと，BEV システムの大きな変更点は，駆

*1,3〜5　PT 制御システム開発部
PT Control System Development Dept.
*2　電子性能開発部
Electrical & Electronics Performance Development Dept.

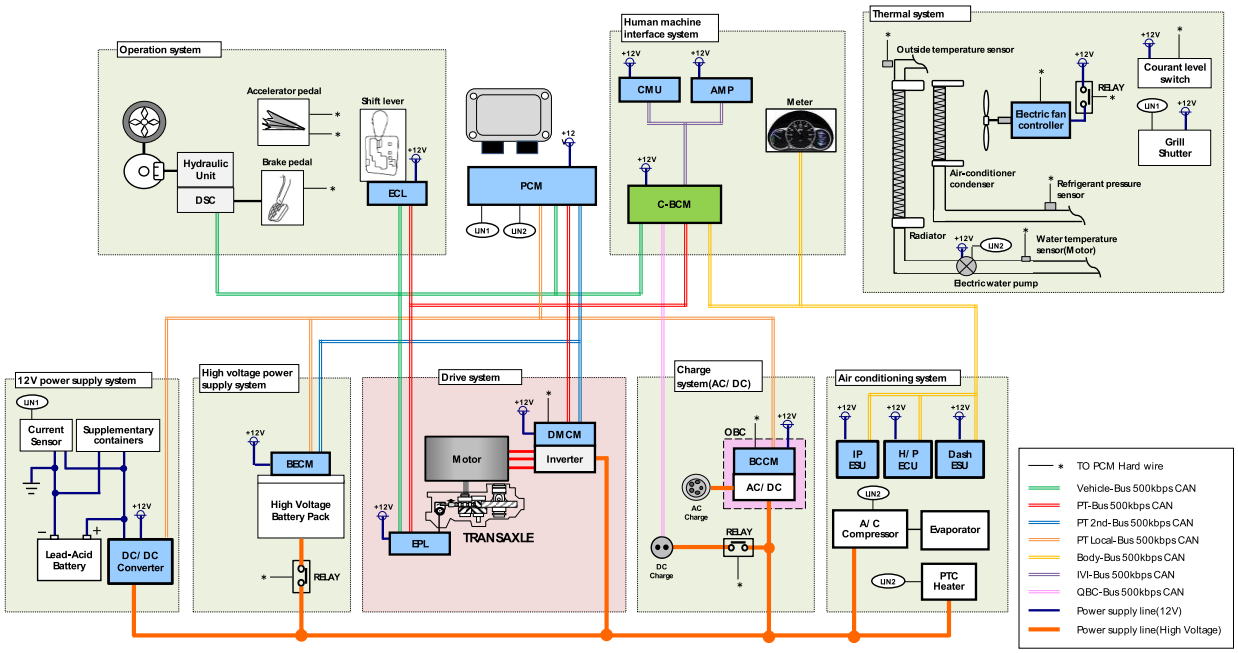


Fig. 1　System Scheme of BEV

Table 1　The Unit Which Cooperates with PCM

DMCM (Drive Motor Control Module)	モーターのコントロールを行う
BECM (Battery Energy Control Module)	バッテリーパック内の電池セルを監視し，測定した情報を統合コントローラーへ通知する
DCDC (DC/DC Convertor)	高電圧の電力から 12V 系の補器電力へ降圧して供給する
OBC (On Board Charger) BCCM (Battery Charger Control Module)	外部電源から車両へ充電を行う。BCCM と AC/DC 変換器部分を統合したユニットを OBC と呼称する
H/P ECU (Heart Pump ECU)	空調（ヒートポンプ）システムを統合コントロールするコントローラー
IP-ESU (Instrument Panel-Electric Supply Unit) Dash-ESU (Dash-Electric Supply Unit)	空調関連の入力操作及び，センサー値を検知し，H/P ECU に通知するコンピューター
A/C Compressor (Air-conditioner Compressor)	エアコンコンプレッサー
PTC Heater (Positive Temperature Coefficient Heater)	空調用のヒーター
C-BCM (Center-Body Control Module)	車両側の統合コントローラー
CMU (Connectivity Master Unit)	コネクティビティマスタユニット
AMP (audio amplifier)	オーディオ用アンプ
DCM (Data Communication Module)	車外とデータ通信するためのユニット

動力源がエンジンからモーターに置き換わることに加え，各高電圧コンポーネントと協調制御して基本的な機能を実現することであり，各高電圧コンポーネントは各々でマイコンをもち，独立して複雑な制御が可能なユニットを配置している（Fig. 1，Table 1）。

BEV は走行時以外にも，充電時，車外からのリモート操作時等，起動コントローラーが通常の IG-ON とは異なる起動要求を PCM へ行い，PCM が関連するコントローラーへ起動指示を行うことで各モードの切り替えを行う。また，KEY-OFF 時も，ユーザーからの遮断要求あるいは，起動中コントローラーからの遮断要求の後，PCM が関連コントローラーの動作停止を確認した上で PCM の処理を止める必要がある（Fig. 2）。

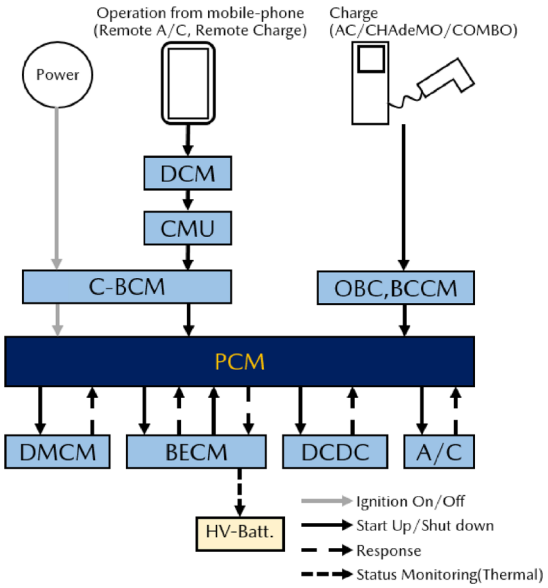


Fig. 2　Startup/Shutdown System

そのため，システムのキーは，統合コントロールするPCMと高電圧コンポーネントが相互に情報をやり取りするCAN通信を中心としたシステムである。

2.2　BEVの制御システムの開発課題

マツダでは，これまでICEを中心としたPTシステムがメインであり，PCMが多くのデバイスを直接コントロールする制御構造となっていた。

ICE車はPCMがエンジン，TCM（Transmission Control Module）がATに付帯するアクチュエータをハードワイヤで駆動させる形であり，イグニッションONするとクランキングを行い，エンジン回転が上がることで起動したと判定され，イグニッションOFFすれば各アクチュエータの電源がOFFされてICEが停止できていたため他のコントローラーとの干渉はほとんど存在しなかった（Fig. 3，Table 1）。

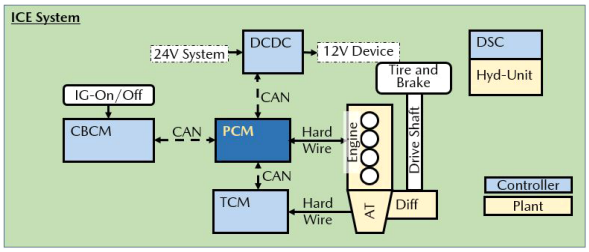


Fig. 3　System Scheme of ICE

しかし，BEVでは前述したとおり，PCMが各高電圧コンポーネントに付帯しているコントローラーと協調制御を行い，コンポーネントのアクチュエータを駆動させる機能分散型システム構成へと大きく変更しており，PCMと各高電圧コンポ―ネント同士が複雑に連携するシステムである。

そのため，BEVのシステムにおいて大きく課題となるのは，“高電圧システムにおける起動／遮断を含むCANネットワークマネジメント”であり，CANを中心としたシステム視点の検証環境の整備，各コンポーネントの設計・検証サイクルを滞りなくスムーズに回すことが開発期間短縮化への手段となる。

このようなBEV特有の課題に対して，高速MILS[1]（High-Speed Model In the Loop Simulation）/HILS（Hardware In the Loop Simulation）と段階的に検証を進めたMBDの適用内容と，ブレッドボード評価／システムベンチの実機を用いたコリレーション分析内容を紹介する。

3. BEVの制御開発へのMBD適用事例

3.1　プラントモデルへの対応：高速MILS

2011年デミオに初搭載したSKYACTIV-G以降，マツダはMBD開発手法の一つとして高速MILSを用いたPCM機能性検証を行ってきており，その開発手法をBEVにも適用させる土台はあった。

しかし，開発当初マツダには電動デバイスのプラントモデルはなかったため，Key ON時の協調制御システムの起動／遮断シーケンス，ICEシステムに存在しなかったKey OFF時の車外の充電器や携帯端末によるリモート操作によるPTシステムの起動／遮断シーケンスについてソフトウェア開発V字モデルの設計フェーズで検証可能とすることを目標に，BEVの検証環境を構築することとした。

高速MILSではコントローラー間の協調機能となる起動遮断機能を再現するため，実機と同等にPCMを中心に各高電圧コンポーネントのコントローラーモデルと各デバイスのプラントモデルを配置，更に車両状態に応じた高電圧ラインを模擬し，モーターが駆動力をタイヤに伝える構造を新規構築した（Fig. 4）。

ICEのMILSでは必要なかったイグニッションOFF時のPCM起動／遮断を可能とするために高速MILSのGUI及びプラントモデルを新規開発した。

また，高電圧バスラインの電流の動きを再現し，高電圧バッテリーパックを中心に電流を受け渡す構造とし，車外充電器との協調制御を検証できるモデル構造としている。

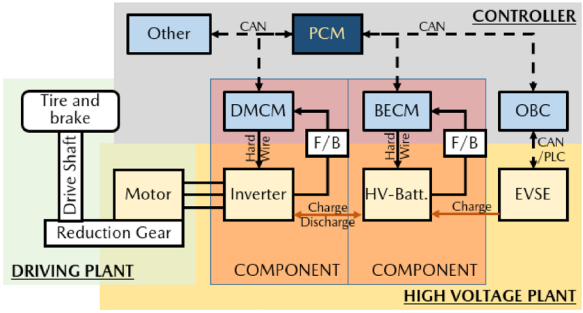


Fig. 4　High-Speed MILS Basic Structure

3.2　CAN中心の検証：HILS領域

HILSは実部品を搭載することで更に実機に近い検証が可能であり，主にハードウェアに依存するCAN/LIN通信，サプライヤーのハンドコード領域，実車での検証が難しいフェールセーフ機能の検証を目的に構築した。特にCAN通信やそのネットワークマネジメント機能は，通信周期に依存する機能分散型システムの協調制御において要となる機能であり，通信タイミングも考慮した検証環境を構築する必要があった。

そこでBEVのHILSは，高速MILSの要件に加えて，新規開発となるCANネットワークマネジメント・起動遮断システム・故障診断の機能性検証をソフトウェア開発V字モデルの検証フェーズで実現することを目標に構築した。具体的には，高速MILSのシステム構成をベースに，CANネットワークマネジメントを備えた通信環境，PCM－高電圧コンポーネント間の故障診断模擬機能，イグニッションOFF時のデータ計測環境を新たに組み込んだHILSを新規構築した（Fig. 5）。

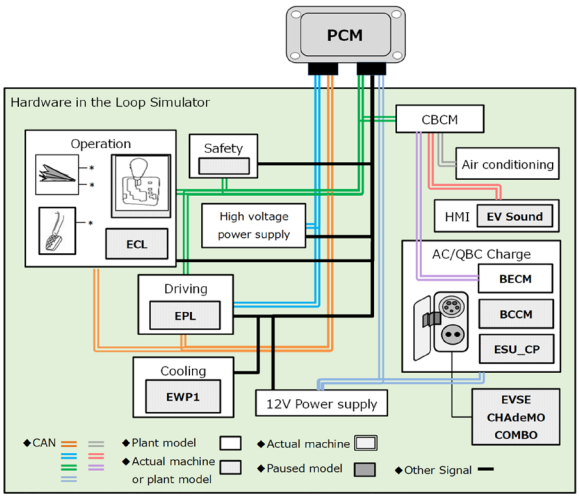


Fig. 5　BEV-HILS Schematic

また，電動パーキングロックアクチュエータなど BEV から新たに電子制御に切り替わった部品は，HILS での早期検証ニーズが多数あった。これに対応すべく，プラントモデル上に ECU 単位で信号を切り替える機能を実装し，プラントモデル⇔実部品（PCM 以外の制御部品や充電設備を模擬するアナライザー）を検証用途に合わせて付け替え可能としたことで，複雑な協調制御パターンを開発初期の段階から検証できる環境を実現した（Fig. 6）。

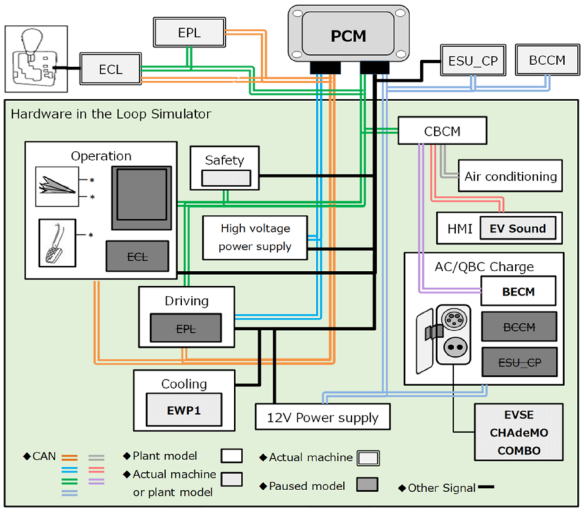


Fig. 6　BEV-HILS (Change models to actual machines)

新規機能には網羅的な検証が必要とされていたが，高速 MILS と違いリアルタイムの検証となる HILS は検証数に応じて工数が跳ね上がる。新機能の検証として約 2500 パターンの検証が必要と判明し，自動検証機能を構築することで検証の効率化を図った。

具体的には，手動で操作していたさまざまな HILS パラメーター操作をパターン別に実施するシーケンスを作成し，ECU の計測ツールと組み合わせ，インプットされた指示に従い操作パターンを順次実行・計測する機能を構築した。複数のテストケースのインプットを自動化し高効率の検証を実現した。また，上記の自動検証環境をベースに故障模擬機能を組み合わせることで，天落や地絡などの故障診断の検証も自動化に対応した。

これらの自動検証環境は，膨大な数の検証を一貫したテストパターンで効率的に検証できることから，オペレーターによる操作のばらつきが抑制され，テストの再現性を向上させることができた。

4. MBD 適用結果の確認早期化

高速 MILS/HILS での検証対象は PCM 以外のモデルであり，モデルでは表現できない機能の成立性検証や，高電圧安全の担保という領域を，その後の開発へフィードバックする施策を実車完成前に検証できる仕組みを導入した。

具体的には 2 つの施策を行った。1 つは，空調制御などの車両系の制御ユニット，DMCM や DCDC といった高電圧コンポーネントを含む PT 系の制御ユニットを組み合わせた 12V 電源制御，通信検証を行うブレッドボード評価（Fig. 7）である。本検証工程の追加により，PT システムでの変化点である CAN 通信が中心のシステムの確認を実車での適合前に可能となり，不具合の早期抽出，MILS/HILS のプラントモデルとのコリレーション分析を可能とした。

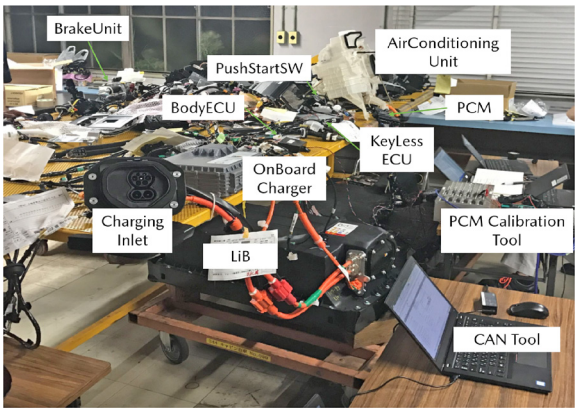


Fig. 7　Breadboard Evaluation

もう 1 つは高電圧コンポーネント等を中心に，実際に高電圧を使用している起動遮断制御から駆動力制御，高電圧安全までの電駆システム検証が行える電駆システムベンチ評価（Fig. 8）である。

本検証の追加により，高電圧を接続するまでのシーケンス制御や，実際に高電圧を使用する駆動力制御や 12V への電源供給制御，普通充電制御の実施，また，高電圧を扱うために必要な安全機能，具体例としては，高電圧遮断時の低電圧化や実機では起こし難い故障時のフェールセーフといった，初期モデルでの机上設計状態では表現が難しい機能のチェックを早期に行い，モデルへのフィードバックを行い，その後は実機レスでの改善，改良を加速した。

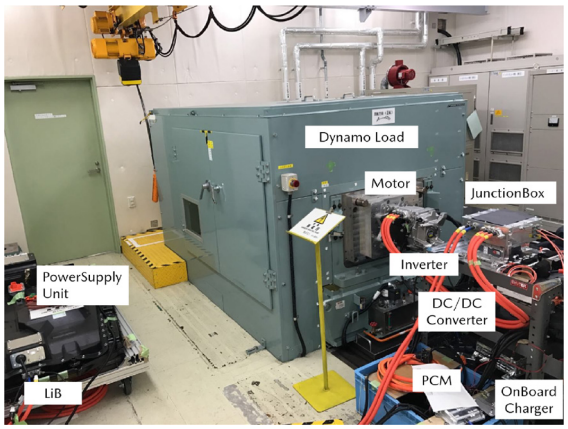


Fig. 8　Electric Driving System Bench Evaluation

本 2 手法の導入により，実車での評価タイミングに，より完成度の高い制御システムを準備でき，開発期間の短縮化に貢献した。

5. おわりに

今回，MX-30 の制御システムの概要と開発へ適用した MBD の内容について解説した。

パワートレインシステムの基幹となる制御構造は，エンジン制御を基盤とするシステム（従来のエンジン車の制御構造）から，統合コントローラー（PCM）と高電圧コンポーネントが CAN 通信を基盤とする協調制御システムへ移行した。

マツダがこれまで培ってきた MBD のモデル化技術により，“高電圧システムにおける起動／遮断を含む CAN ネットワークマネジメント”の挙動をモデル化することで，高速 MILS/HILS にて検証を進めることが可能となり，BEV のパワートレイン制御システムを短納期にて開発を進めることができた。

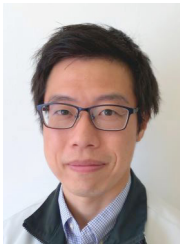
本開発手法は，今後の電動車開発のベースとすることで，今後の車種開発においてより一層のスピード向上を目指した改善を進めていく所存である。

参考文献

(1) 臼田ほか：SKYACTIV の MBD 検証環境について，マツダ技報，No.31, p.48-53（2013）

■著　者■

三戸 秀樹


北川 浩之

鴫濱 真悟

明神 未季

田中 大介

特集：MAZDA MX-30

08

MX-30 高電圧システム制御の紹介
High Voltage Control System for MX-30

藤岡　真也 *1　川田　卓二 *2　北川　浩之 *3
Shinya Fujioka　Takuji Kawada　Hiroyuki Kitagawa

要　約

マツダは技術開発の長期ビジョン「サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言 2030」に基づき，2030 年時点で生産する全ての車に電動化技術を搭載することを発表した。今回，全ての電気駆動システムにおける高電圧コンポーネントを統合制御するパワートレイン制御 ECU を中心としたシステム構造を構築し，モデルと実機を活用した検証により品質を担保した。これにより，電気駆動システムの多様化に伴って複雑化するパワートレインの全ての機能を，安全かつ不整合なく動作させる高電圧システムを短期間で開発することに成功した。本稿では，MX-30 へ実装した新たな制御構造を採用した高電圧システムの技術紹介を行う。

Abstract

In line with its “Sustainable Zoom-Zoom 2030” long-term vision for technology development, Mazda announced that electrification technologies will be applied to all cars produced as of 2030. We built a system structure mainly composed of the power train control ECU that controls all high voltage components of electric drive system, and secured quality by the inspection, utilizing a model and an actual machine. As a result, we succeeded in developing a high voltage system in a short term, which enables secure and consistent operations of all power train functions that have become complicated due to the diversification of the electric drive system. This paper introduces technologies of the high voltage system which applied the new control structure that we implemented to MX-30.

Key words : Power Transmission, Power Transmission, Electric vehicle and hybrid electric vehicle control, Electronic control unit, Control system, Design optimization

1. はじめに

マツダは技術開発の長期ビジョン「サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言 2030」に基づき，2030 年時点で生産する全ての車に電動化技術を搭載し，「SKYACTIV マルチソリューションスケーラブルアーキテクチャー」の商品として，ハイブリッドモデル 5 車種，プラグインハイブリッドモデル 5 車種，EV モデル 3 車種を順次導入する予定としている（Fig. 1）。これらマルチソリューション実現に伴ってパワートレイン制御が複雑化し，協調制御が必要な制御ユニットが増加するため，全ての機能を安全かつ不整合なく動作させるシステムを短期間で開発することが大きな課題となっている。

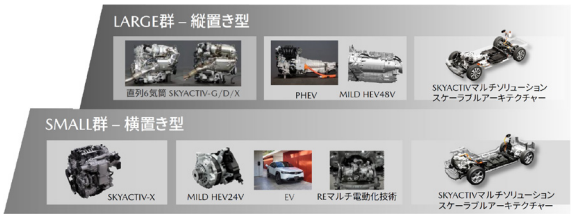


Fig. 1　SKYACTIVE Multi Solution Scalable Architecture

2. マルチソリューション実現に向けたアプローチ

マルチソリューション実現に向けて，従来からエンジン制御の領域で取り組んできた一括開発の考え方を電気駆動システムの制御にも適用し，マツダが導入する電動

*1,2　PT 制御システム開発部
PT Control System Development Dept.
*3　電子性能開発部
Electrical & Electronics Performance Development Dept.

車間での多様性と開発効率を高める共通性を高次元で両立させることで，商品力を高めることを目指した。そこで，全ての電気駆動システムを統合制御する Powertrain Control Module（PCM）を中心とした制御システム（Fig. 2）と，PCM 内部のソフトウエア構造を一括開発（Fig. 3）し，BEV として必要な機能のみを取捨選択することで MX-30 EV MODEL（以下 MX-30）の短期開発をねらった。

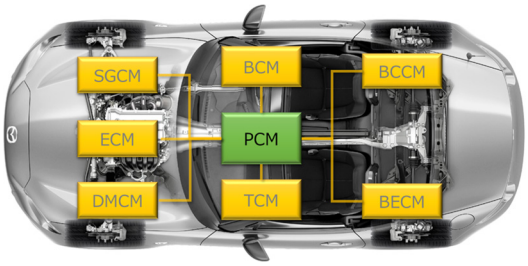


Fig. 2　Electric Drive Control System Architecture

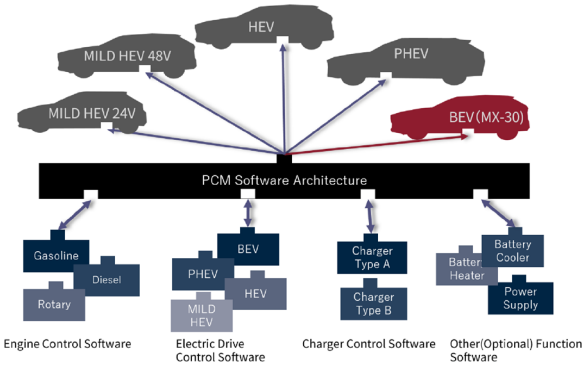


Fig. 3　PCM Software Architecture

3. 電動化に伴う機能追加

従来の内燃車（ICE 車）では“走行機能”が主目的であったが，電動車では，充電・プリエアコンなどといったパワーソースを使用した機能が追加となる。そのため，マツダの次世代商品群で導入する電気駆動システムで想定する追加機能を抽出し，高電圧を扱って制御する高電圧システムの一括構造を構築した。本章では MX-30 にて追加した機能を紹介する。

3.1　MX-30 に実装する機能紹介

新型 MX-30 では ICE 車に対し以下に紹介する単機能（1）と，組み合わせ動作で商品性向上を図る機能（2）を追加した。

（1）単独で動作する新機能

DC 充電（急速充電）：急速充電機から駆動用バッテリへ DC 電力で充電する。

AC 充電（普通充電）：家庭用コンセントなどからの AC 電力を DC 電力に変換して駆動用バッテリへ充電する。

プリエアコン：出発時刻をあらかじめ設定する（タイマエアコン），またはスマートフォンで遠隔操作する（リモートエアコン）ことで，車に乗る前に，冷暖房やガラスの曇り取りを作動する。

バッテリヒータ：駆動用バッテリの温度が低下すると走行性能や充電性能が低下するため，バッテリヒータによって駆動用バッテリの温度を保つことで，性能の低下を抑制する。

バッテリクーリング：運転終了後の駆動用バッテリ温度が高温時，駆動用バッテリの劣化を防ぐために駐車中に駆動用バッテリを冷却する。

補充電：12V バッテリの消費が所定量を超えると，駆動用バッテリ電力から 12V バッテリを充電する。

（2）組み合わせて動作する機能

機能作動中の電力補填：プリエアコンやバッテリヒータ使用時に充電コネクタを挿入状態であれば外部電力系統から充電することで駆動用バッテリ容量低下を抑制する。

除霜：ヒートポンプ運転で発生した霜を充電放置中に溶かすことで，次回の空調時に PTC（Positive Temperature Coefficient）ヒータより高効率な電動コンプレッサーの作動割合を増やし，効率を上げる。

充電時のバッテリヒータ：冷間状態での充電時に駆動用バッテリを温めることで，早期に駆動用バッテリ受け入れ電力を上昇させ，充電時間を短縮する。

3.2　複数機能追加への課題

3.1 節で紹介した機能を安全性・利便性を両立し高電圧システム一括開発で MX-30 に実装していくためには，以下 3 つの課題に対してブレイクスルーが必要となった。

（1）安全性と利便性の両立した機能実装

ICE 車では，キーをイグニッション ON 状態にすることで全てのユニットを起動してきた。しかし電動車では，“充電”や“プリエアコン”といった，ユーザーが車両に不在の状態を想定した機能が追加となる。その際に全てのユニットを起動させると，本来作動させたくない機能が意図せず動作してしまうなどの安全上の懸念や，無駄な電力を消費してしまうことによる充電時間の増加や走行可能距離の低下，更に 12V バッテリ上がりの助長にもつながってしまう。そのため，安全性・利便性を両立させるためには必要なタイミングで必要なユニットを起動させることができるシステム構成が必要となる。

（2）複数機能間の整合取り

ユーザーの使い方によっては，各機能を同時に動作させようとするシーンも発生する。とはいえこのとき，これらの機能は，同時に動作させてはいけない背反機能と，同時に作動させる共存可能機能の関係性が存在する。例えば，ユーザーが AC 充電中にスマートフォンで“プリエアコン”を作動させるシーンにおいては，“AC 充電”と“プリエアコン”の両方を作動させたい。一方，“充

電”中は家屋と車両が充電ケーブルで接続されているため，“走行”はできないようにしなければならない。

ユーザーの要求に対して，共存できる機能は積み上げて作動させてユーザーの利便性を確保しつつ，背反するものは拒絶または上書きして安全を担保させる仕組みを構築し，これを不整合なく動作させるソフトウエア構成が必要である。

(3) 機能追加削除可能な拡張性

CASE での急速な電動化の進化により今後さまざまな機能追加が想定される。これら新規機能を必要な車両にタイムリーに導入しなければならない。更に，各機能を実現するために追加ユニットが必要になる。そのため，機能やユニットを追加・削除が自在にコントロールできるプラグアンドプレイの仕組みを構築する必要がある。

4. MX-30 への新機能実装

これまでマツダでは幾つか電動化技術を導入してきたが，どれも個別開発を行ってきた。そのため，ICE 車のシステム構造ではマルチソリューションに対応できる拡張性をもっておらず，BEV 機能追加が容易な状態ではない。そのため，第 3 章での課題を解決できる新世代商品群で適応可能な以下の制御構造・システム構成に刷新した。

4.1　高電圧エレキシステム構成（電源構成）

ユーザーが機能を必要とするタイミングで必要なユニットを起動させるため，ICE 車の PCM を高電圧システムの頭脳 ECU として設定し，高電圧コンポーネント（以下コンポーネント）の起動遮断や動作を管理する構造を構築した。その際，各ユニットとの起動遮断 IF をシンプル化し，ユニット間通信も PCM との Peer to Peer 通信を基本とした（Fig. 4）。

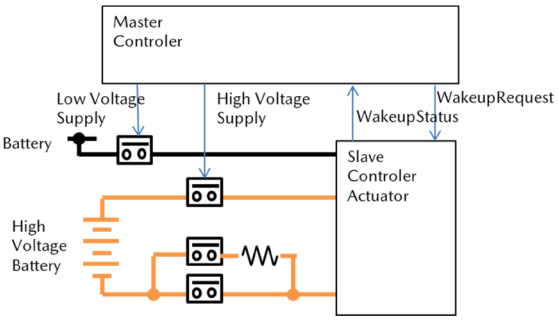


Fig. 4　Electric System Configuration

これにより，電気駆動システムによってコンポーネントが増減した場合でも，容易に PCM で差分を吸収することができる。各コンポーネントにおいても，何の機能で起動されているかは認識せずとも，頭脳 ECU に従って必要なタイミングで起動，動作すればよい。そのため，使われ方が変わっても各コンポーネントに影響を与えない。加えて，不必要なシーンで起動しないため間違って動作することもない。こうした構造を設定することで，安全面の確保と，マルチソリューション実現に向けた電気駆動ユニットのプラグアンドプレイ構造を実現した。

4.2　高電圧エレキシステム構成（通信構成）

近年の ECU は通信で起動遮断できることで機能の幅が広くなる一方，通信が行われることで不必要な ECU まで起動してしまうのが現状であり，またその際の消費電力も増加している傾向にある。そのため，これを通信トポロジの適正化によって防止した（Fig. 5）。

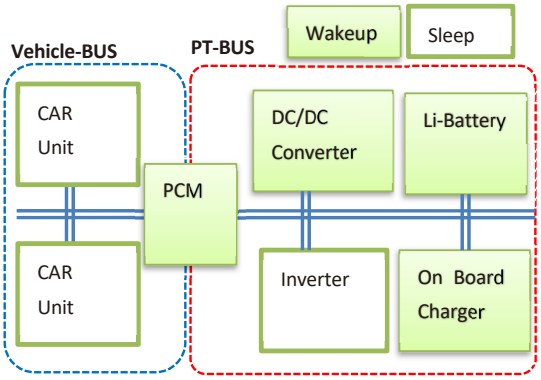


Fig. 5　Network Topology

“充電”などの機能では，充電制御の通信は常時必要であるのに対し，ユーザーへの通知などによる通信は機能開始時や終了時のみ必要と限定的である。そのため，充電制御に関係する電気駆動系のユニットと，ユーザーへの通知などの車両系のユニットで分離したトポロジを採用した。その際に，PCM が電気駆動系と車両系の通信の仲介を担い，電気駆動系のみで通信可能となるような NM（Network Management）システムを構築した。これにより，充電中は車両系の不必要なユニットを遮断できる構造とし，電力消費を最小化するとともに充電時間短縮といった性能向上を実現した（Fig. 6）。

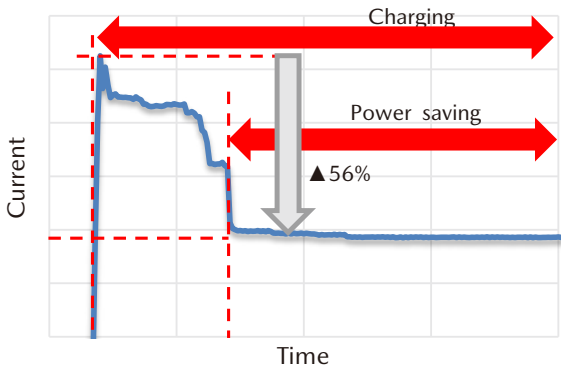


Fig. 6　Current Consumption

4.3　マトリックスによる一括モード管理

複数機能を安全かつ不整合なく動作させるため，ユーザー操作に対して一括で作動させる機能を管理する仕組み（ユーザーマトリックス）を構築した。ユーザーマトリックスは，パワーソース（駆動用バッテリ電力・ガソリン燃料・外部電力などのエネルギー）を使用する機能をマトリックスで管理し，商品性や安全性の観点から各機能間の優先度を設定する。これにより，領域をまたがった機能の作動要件を一元管理し，要件の抜け漏れ防止や全体の統一性を図った（Table 1）。更に，これを頭脳 ECU である PCM で一括管理することで，不整合のない機能作動を担保する構造を構築した。

また，今後の電気駆動システムの進化に伴う新機能追加時も，本マトリックスを拡張することでフレキシブルな対応を狙う。

Table 1　User Matrix

Before \ User Action		Key-OFF	ACC	IG	Driving	AC Charging			DC Charging	Pre-Air Conditioning		Battery Heating	Battery Cooling	Pb Charging	Defrosting	Heating for Charging	Charging for other function	Air Conditioning
						Prug-in	Remote	Timer		Remote	Timer							
Key-OFF			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-
ACC		×		○	○	○	○	○	○	×	×	○	×	○	×	-	-	-
IG		○	○		○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	-	-	-
Driving		○	×	×		○	-	-	○	×	×	×	×	×	×	-	-	○
AC Charging	Prug-in	○	○	○	×		○	○	×	○	○	○	O	×	○	-	×	○
	Remote	○	○	○	×	○		×	×	○	○	○	O	×	○	-	×	○
	Timer	○	○	○	×	○	×		×	○	○	○	O	×	○	-	×	○
DC Charging		○	○	○	×	×	×	×		○	○	×	×	×	○	○	×	○
Pre-Air Conditioning	Remote	-	○	○	○	○	○	○	○		×	○	-	×	-	-	O	-
	Timer	-	○	○	○	○	○	○	○	○		○	-	×	-	-	O	-
Battery Heating		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		-	×	-	-	O	-
Battery Cooling		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-		×	-	-	O	-
Pb Charging		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		-	-	-	-

○ Enable　×Disable　－No Care

5. 高電圧システム検証

MX-30 では，複数機能を追加したことに伴い，ユーザー操作インターフェースと，それによって変化する車両の状態，通知などのユーザーフィードバックの組み合わせが無数に存在する。これらを，モデルと実機を使い分けて効率的かつ網羅的に検証を行い，開発品質を担保した。

5.1　モデルによる検証

各コンポーネント間の検証は，1:1 の協調制御のみでなく，各機能作動においては複数のコンポーネントとの協調制御が同時並行して作動し非常に複雑化している。これら協調制御を破綻させずにあらゆるシーンでもねらいの動作を実現できることを MILS（Model In The Loop Simulation）にて検証した。MILS ではパラメーターを自在にコントロールできる特性を生かし，協調制御のフィードバックを通常応答・応答なし・異常応答に振ったテストを実施し，各機能の検証を行った。

各機能間での成立確認については，ユーザーマトリックスで規定した状態遷移が正しく遷移することを HILS（Hardware In The Loop Simulation）にて検証した。HILS ではユーザーモデルと車両モデルを実装し，機能追加によって増加したユーザー操作を，さまざまな車両状態から入力して検証を行った。

更にこれらモデル検証は，自動でテストパターンを順番に実行できる環境を構築することで，効率的に短期間で検証を完了した。

5.2　実機による網羅性検証

実機検証では機能追加に伴って増加した，ユーザー操作や画面などの通知といったユーザーインターフェースに着目して検証を行った。停車／走行，キー OFF／ACC／IG などの 12V 系電源状態，高電圧電源状態，シフトなど各車両状態に応じてユーザー操作に対する応答や画面状態を網羅的に検証する必要があるが，組合せが無数となり発散してしまう。

そこでユーザー操作に対する応答と画面表示は，検証したい項目に焦点を当てユーザー操作に対する応答と画面表示は別評価とし，それぞれを詳細に検証することで網羅性を担保することとした。ユーザー操作に対する応答は，先述のユーザーマトリックスを活用し車両の状態変化に着目した複合状態遷移テストで，画面表示についてはメーター／ヘッドアップディスプレー／センターディスプレー／ロアディスプレーの 4 つの画面変化に着目した画面遷移テストで詳細に検証を行った。

複合状態テストの充電機能検証では，キー OFF から充電コネクタを挿入し，充電状態に遷移する基本的な動作だけではなく，充電コネクタ挿入タイミングでパワースイッチを操作するといった二人同時操作も実施した。また，充電コネクタを挿してから実際に充電電流が流れて充電開始するまでの間に充電設備停止スイッチを押すなどの状態遷移中に別操作の割り込みテストやパワースイッチの連続操作による EV システム作動 ON/OFF 繰り返しテストなど，あらゆる操作を想定して網羅的に検証を行っている。

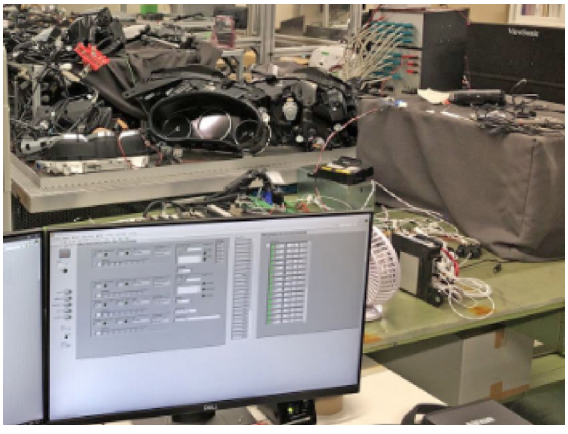


Fig. 7　Verification by HILS

画面遷移検証では HILS を用いてワーニング閾値の確認，その際のメーターとセンターディスプレーの表示連携や画面遷移の確認を行った。例えば，電欠と出力制限のワーニング条件が同時に成立した際に優先度に従い調停された表示となるか検証を実施している（Fig. 7）。

更に，開発品質を確保するために，取扱説明書をベースに車両操作を行っていく「オーナーズマニュアルテスト」，車両の電源状態（＋B，ACC，IG，Ready，Sleep）が遷移した場合に，各種情報の保持／破棄，復帰後の機能動作が仕様どおりになることを確認する「電源状態遷移テスト」，充電などの機能がハードウェア故障，もしくは動作できない状態になった場合のシステムの挙動，及び正常状態に復帰した場合のシステムの挙動を確認する「障害対応テスト」など，Table 2 に示す 9000 とおりを超えるテストケースを抽出の上，事前に机上検討を行うことで実機での試験数を抑制し，約 3000 とおりの実機検証により網羅性を確認した。

Table 2　List of Verification in Function

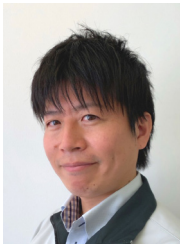
Function	Sub Function	Owners Manual Base Test	Charge Standard Test	Functional Operation Test		State transition Test		Displaya Transition Test	Cumulative operation Test	Trouble shooting Test	Use Case Test	Total
				Conflict Test	Threshold Matching Test	Composite State Transition Test	Power Supply Transition Test					
Charge	AC Charge	1			24	2239	23	-	9	28	2	2326
	DC Charge(CHAdeMO)	1	276	-	-	78	-	-	5	28	8	396
	DC Charge(COMBO)	1	-	-	24	2063	53	-	5	28	9	2183
Remaining Distance Disp.	HEC Display Request	18	-	-	40	68	84	-	7	20	-	237
	Fail Safe	-	-	-	-	54	-	-	-	-	-	54
A/C	Interaction Display	3	-	-	-	-	-	5	-	-	-	8
	AC Control	158	-	-	-	1368	-	19	1	28	30	1604
	Setting Window	12	-	-	-	-	184	4	-	-	5	205
	Pre A/C Information Disp.	3	-	-	-	-	22	4	3	-	8	40
	Light, Sound Contorol	44	-	-	-	-	-	-	-	-	-	44
	Failure diagnosis	2	-	-	-	54	-	-	-	-	-	56
Warning, Guidance	Meter Disp.	154	-	635	24	-	-	490	-	-	-	1303
	User Setting of Center Disp.	134	-	-	-	214	239	563	-	-	24	1174
	Remoto Control	15	-	-	-	84	36	-	-	-	2	137
	Charge Inlet Control	18	-	-	-	-	12	-	-	-	-	30
	TPMS	1	-	-	-	-	13	-	-	-	-	14
	Door Lock	2	-	-	-	-	-	-	-	-	38	40
	Key Less Entry	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4
	Filler Lid	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
	Burglar Alarm	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3
	Information Sound Control	3	-	210	-	-	-	-	-	-	-	213
	Maintenance	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4

6. おわりに

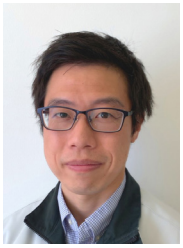
今回，高電圧システム一括開発で構築したシステム構造を，新型 MX-30 へ実装した。このシステム構造により，複数機能を短期間で安全かつ不整合なく確実に作動する高電圧制御システムを実装することができた。

このシステム構造を後続する電気駆動車へ順次展開していくことで効率的に市場導入し，マルチソリューションに対応していく。更に，プラグアンドプレイ構造により CASE による電動化の急激な進化についてもフレキシブルに対応し，お客さまに『走る歓び』と『優れた環境・安全性能』を提供していく。

■著　者■


藤岡 真也

川田 卓二


北川 浩之

特集：MAZDA MX-30

09

MX-30 EV MODEL の外部充電システム開発
Electric Vehicle Charging System Development for MX-30

土井　政寛 *1　徳永　隆司 *2　藤原　康祐 *3
Masahiro Doi　Ryuji Tokunaga　Kosuke Fujiwara

要　約

MX-30 EV モデルの外部充電は欧州仕様では CCS2（TYPE2），北米仕様は CCS1（TYPE1），日本仕様では CHAdeMO＋AC 充電（TYPE1）を搭載し世界の充電方式をサポートしている。これらの充電規格と充電設備全てに対して互換性を持たせることが開発の課題である。MX-30 の充電システム開発では，これら多数の変化点を持った充電システムの同時開発が求められたことに対し，一括制御構造を構築し主に固定と変動に制御機能を分けて管理することにより効率化を実現した。加えて机上検証環境として充電設備モデルを MILS（Model In the Loop Simulation）及び HILS（Hardware In the Loop Simulation）環境内に構築して充電システムの成立性を早期に検証した。本稿ではこれら外部充電システム開発について報告する。

Abstract

The MX-30 is equipped with CCS2 (TYPE2) for European specifications, CCS1 (TYPE1) for North American specifications, and CHAdeMO＋AC charging (TYPE1) for Japanese specifications to support charging around the world. Achieving compatibility among the charging standards and charging equipment is the challenge in the development. In the development of the charging system for the MX-30, we have built a new control structure that classified control functions between fixed functions and variable functions to properly manage them, contributing to the reduction in man-hours. Here we report on the development of the series of external charging systems.

Key words：EV and HV systems, Electronics and control, Filling infrastructure, Control simulation hardware in the loop simulation, Power storage system

1. はじめに

電気自動車の駆動用バッテリーの充電は DC 充電（急速充電）と AC 充電（普通充電）に大別される。急速充電は主に出先で使用されるスタンドタイプの充電器を使う方式で MX-30 は約 40 分で SOC（充電率）80% まで充電できる。普通充電は主に自宅で使用される充電方式で約 5 時間で満充電となる。世界の急速充電の種類（コネクタ形状，規格）には主に急速充電口と普通充電口を共通化した CCS（Combined Charging System/通称 COMBO）と CHAdeMO，GB-T が規格化されている（その他 Tesla 社独自の方式もあり）。また普通充電には主に TYPE1/TYPE2，GB-T，Tesla 社独自の仕様が存在する。MX-30 は欧州，北米，日本の異なった仕向け地に展開されるため，欧州仕様では CCS（TYPE2）（Fig. 1），北米仕様は CCS（TYPE1），日本仕様では CHAdeMO＋普通充電（TYPE1）の各仕様に対応する。これにより各国のお客様に充電で不自由を感じることなく MX-30 EV を楽しんでいただいている。

2. EV の充電システム開発課題

マツダは過去の EV 開発[(1)] の中で，市場の充電器にて充電ができないトラブルを経験してきた。これは，充電設備製造メーカー各社の充電規格解釈が異なる部分があるために，同一規格をベースとしながらもユニークな振る舞いをする充電器が多数存在したことが主な原因であった。現在でも欧州や北米，日本にて同様な状況であるため，このような状況でも世界の市場で充電に関する不具合を発生させないことは大きな課題である。加えてタイムリーに商品をお客様にお届けするため，効率的な開発手法の確立も求められた。

*1　PT 制御システム開発部
PT Control System Development Dept.

*2,3　電子性能開発部
Electrical & Electronics Performance Development Dept.

Fig. 1　MX-30 Charging Port（CCS Type2）

3. EV の充電システム開発手法

前章で述べた課題を解決するために，開発に際し以下の施策を講じた。

（1）一括開発を実現する充電システムの構成：ハードウェア変更最少で各種充電規格に対応可能な充電システム構成を検討・採用する。

（2）充電システム制御ソフトウェアの MotherSoftware 構造：ソフトウェア変更最少で各種充電規格に対応する制御ソフトウェア構造を採用する。

（3）充電システムの検証環境構築：効率的にソフトウェア／ハードウェア（車両）検証を進めるための検証環境を開発する。

3.1　一括開発を実現する充電システムの構成

MX-30 の充電システムは各種充電規格に対応するためのハードウェア変更を最小にするために次の構成とした。構成ユニットは主に OBC（On Board Charger），駆動用バッテリー，PCM（Power Control Module）から構成される。OBC は AC/DC 変換，充電 I/F のコントロール及び普通充電の TYPE1 と TYPE2 の切り替えと CCS の通信を行う。PCM は高電圧制御，目標充電電力の計算と充電器との I/F のコントロールを行い，更に日本仕向けのみ CHAdeMO 充電用 I/F をコントロールする。本構成とすることで普通充電の TYPE 変更（TYPE1↔2）は OBC のみで対応でき，急速充電の規格変更（CCS↔CHAdeMO）は PCM で対応できるようになり，規格変更による影響範囲をシステム構成上で最小化している。

3.2　充電システム制御ソフトウェアの MotherSoftware 構造

車両－設備間の充電シーケンスや充電量をコントロールする充電システム制御ソフトウェアには充電規格ごとの設計変更を最小とするために MotherSoftware 構造を開発し，PCM に実装した。この MotherSoftware 構造では主に充電ソフトウェアの主要機能を固定と変動に分類・管理することで変動領域（設計変更による影響範囲）の最小化を目指した。例えば各種充電規格へ対応するソフトウェア部分を変動と位置付けて機能配分することで充電規格の変更（CHAdeMO↔CCS 等）を効率的に対応できるようにした。

この MotherSoftware 構造のイメージを図にあらわしたものが Fig. 2 である。PCM の制御は 1 つのメインソフトウェア（MotherSoftware）で管理しており，充電システム制御ソフトウェアを他の規格に対応させることを容易にする仕組みを採用した。例を挙げると，Core 部分に該当する高電圧の制御を変更する場合に MotherSoftware を変更すれば欧州，北米，日本への変更が同時に行われることを意味する。また，今後導入が予想される給電システム等の追加にも同様にして効率的に対応できる仕組みとなっている。MX-30 ではこの仕組みを活用し欧州，日本，北米，豪州の仕向け地に適合させた充電システムを効率的に同時開発した。

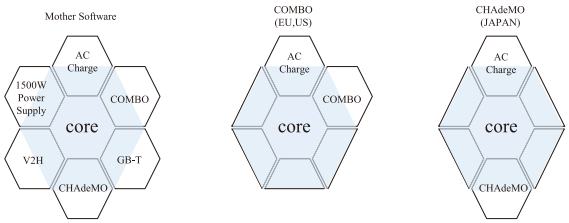


Fig. 2　Fixed and Variable Area Image Diagram of Charging System Control

3.3　充電システムの検証環境構築

充電システムと制御ソフトウェアの検証環境として，MILS 及び HILS を開発した。これらの構成は Fig. 3 のとおりで，充電設備側と車両側それぞれの制御シーケンスが確認できるよう，充電設備モデルを検証環境に組み込んだ。以下，構築した各モデルと検証環境を，机上と実車検証環境の大きく 2 つに分けて紹介する。

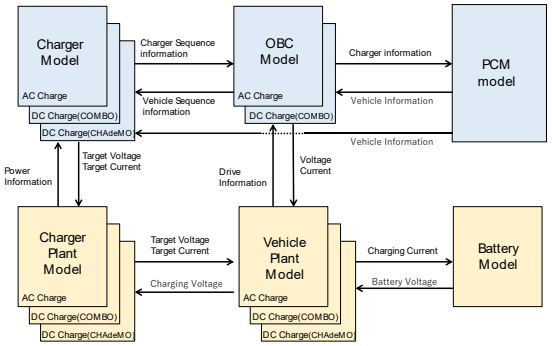


Fig. 3　Charging System Verification Environment

（1）机上検証環境

開発の初期段階にて充電制御ソフトウェアを効率的に開発・検証するため机上検証環境（MILS）を構築した。以下，MILS を構成する各モデルを紹介する。

1）設備制御モデル

設備制御モデルは車両に接続された充電設備の充電時の振る舞いを再現したものである。具体的には，充電タイプ（CCS，CHAdeMO，普通充電）で指定された充電方式に応じて車両側に対してスイッチ制御及び充電情報／状態設定を行い，コネクタ勘合～車両システムの起動～充電開始手順～充電動作～充電終了手順～車両システムの終了～コネクタ抜去までの充電シーケンス制御を再現する。更に設備制御モデルは充電のインターフェースに関して市場設備独自の振る舞い（遅れ，独自仕様等）を再現できる仕組みにした。具体的には充電のシーケンスに関わる信号の応答時間等の挙動を市場で確認した設備挙動と一致させ，車両側制御と協調動作した際の成立性を机上で確認できるようにしている。これは過去の充電システム開発にて車両と設備の挙動タイミングのずれにより異常を誤検知する等の問題を経験したことから，その挙動を MILS で再現することで，充電システム制御の成立性を早期に確認できる仕組みとしたものである。

2）PCM モデル

PCM モデルは車両コントローラーの制御モデルで，主に設備側に対してスイッチ制御及び充電情報／状態送信を行っている。具体的にはコネクタ勘合認識～高電圧起動～充電開始～充電動作～充電終了判定～遮断までの充電シーケンス制御を再現する。

3）設備プラントモデル

設備プラントモデルは車両に接続された充電設備そのものを再現したものである。具体的には，設備制御モデルからの制御信号（スイッチ，電流指示）に応じて設備制御モデルへのスイッチ状態通知，車両側への電流指示値設定を行う。

4）車両プラントモデル

車両プラントモデルは設備プラントモデルから受け取った充電情報から，車両側の LiB の電圧・電流値や高電圧回路の状態を再現する。

MILS では上記の制御／プラントモデル全体を自動実行できる仕組みも取り入れており，一部運用を開始している。今回 MX-30 で収集した市場データを設備モデルへ適用することで，次期モデル以降にて更なる開発効率化を目指した机上検証の完全自動化も準備している。

（2）実車検証環境

この環境により各種充電規格，電源タイプ（単相，3相，電圧）の変更，異常状態や故障の模擬などが容易に行えるようになった。加えて市場設備ユニーク挙動の再現も行うことができ，例えば欧州市場の充電設備の挙動を開発拠点の日本で再現できるようになり，不具合原因の特定などが容易になった（Fig. 4）。

Fig. 4　Real Vehicle Verification Equipment

4. 充電設備との互換性開発

これまでに MILS や HILS で開発してきた充電システムの最終確認のため，MX-30 の開発では実車を用いた互換性検証を Lab（一般の充電設備ではない Closed な環境）と各仕向け地にて行った。なおここでの「互換性」とは車両 - 設備間で規格に則った充電を開始・継続できるかどうかを指す。

4.1　LabTest による充電設備との互換性検証

MX-30 の試作車両では初めに Lab にて各仕向地のシェアの高い充電設備と互換性検証を行った。その結果ある特定の設備と結合することで判明する規格不適合箇所（車両と設備共）や充電開始できない問題を洗い出すことができた（Fig. 5）。

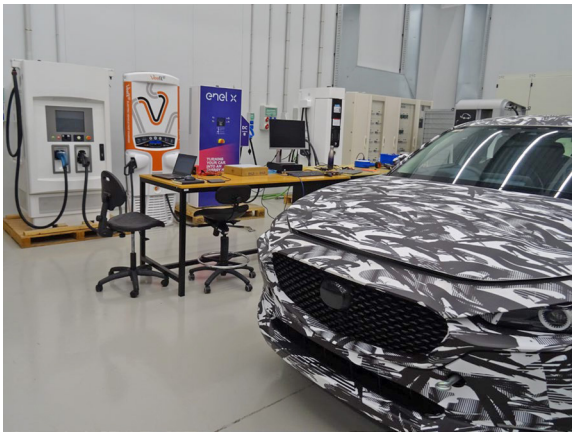


Fig. 5　Verification of Conformity with Charging Standards

4.2　市場互換性確認（Infield Test）

3 章で述べた検証環境で事前に検証していたにもかかわらず市場での確認では互換性に関する問題が確認された。それらは規格に則って構築された机上検証環境では発見できない設備独自の仕様が起因していた。今回知見

を得られたこのような互換性開発の難しさを示す具体例をいくつか紹介する。

市場互換性確認で得られた知見の例

－① DC 充電（急速充電）

CCS 充電設備との互換性確認では充電設備によって充電電流の立ち上がり方にかなりの差異があることが確認されている（Fig. 6）。Manufacture A の電流の立ち上がり方が最も一般的な充電電流挙動であるが，市場には B ～ E のような挙動を示す設備も確認された。こうした充電電流挙動の違いがあることをしっかり認識し，またこれに対して柔軟に対応できる充電制御システムを準備しておかないと，異常を誤検知しかねない。MX-30 ではこうした充電設備の特色の違いにも対応できるよう，ある程度の制御余裕度を持たせたシステム開発を行った。

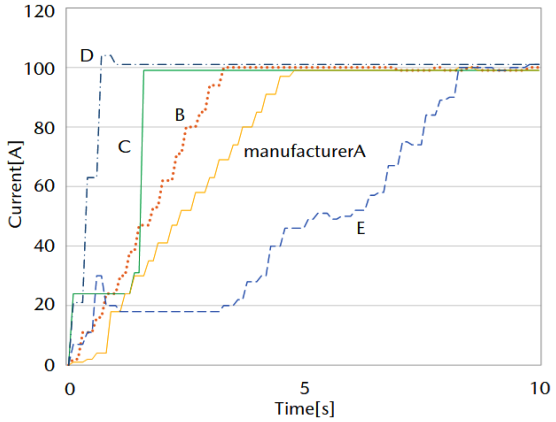


Fig. 6　Difference in Charging Current Rise

－② AC 充電（普通充電）

普通充電設備及び普通充電ケーブルでの互換性確認では，欧州メーカー製の充電ケーブル（EVSE）で充電規格上では定義されていない独自の異常判定仕様をもっているものが確認された。これは車両側との接続のタイミングによっては異常判定し，充電出来ない状態に至ってしまうものであった。この充電ケーブルの仕様は充電規格上必要とされてはいないが，車両側で対応しなければ充電が開始・継続できない仕様であった。本件についても車両側の充電シーケンスのタイミングをある程度余裕度を持たせた制御システム挙動とすることで対応を実施した。

以上より現状の充電システムの検証については MILS や HILS のような仮想環境だけではどうしても発見・解決できない事例が少なからず存在するため，現時点では実車による結合性確認は外せない検証となっている。

5. まとめ

MX-30 の開発では一括構造を構築し効率的に各仕向け地の充電方式に対応した。また充電システム検証用の MILS，HILS 環境を構築することで実車検証前に充電システムの成立性確認ができるようになった。ところが MILS，HILS だけでは発見しきれない互換性に関する問題も少なからず発生することも確認された。このため実車を用いた市場結合性確認を織り交ぜながら全方位で充電システムの品質を確保していく必要があると理解している。

MX-30 の開発はコロナ渦での開発となり，特に各国への入国が制限され現地での試験が難しい状況での活動となった。しかしそのような環境下においても現地サプライヤー様，関連会社の皆様のご協力のおかげで評価を進めていただくことができ，当初予定していた評価を全て完了することができた。末筆ながらご協力いただきました全ての関係者の皆様に改めて感謝を申し上げたい。

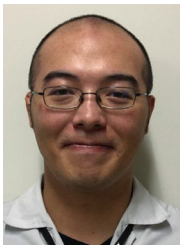
参考文献

（1）藤中ほか：デミオ EV の紹介，マツダ技報，No.30，pp.114-119（2012）

■著　者■

土井 政寛

徳永 隆司


藤原 康祐

特集：MAZDA MX-30

10 高電圧電池パックの耐振動性開発

Vibration Resistance Development for High Voltage Battery Technology

伊藤　智昭 *1　丹羽　貴大 *2　花田　裕 *3
Tomoaki Ito　Takahiro Niwa　Yu Hanada
岸田　直樹 *4　鍋島　範之 *5
Naoki Kishida　Noriyuki Nabeshima

要　約

マツダはクルマのライフサイクル全体での CO_2 排出量を考え，各国に対応できるマルチソリューション戦略を推進している。今回，カーボンニュートラル実現の第一歩であるマツダ初の量産電気自動車である MX-30 EV MODEL を開発した。MX-30 に搭載する高電圧電池は，お客様の求める走行距離，走行加速性能，回生ブレーキ性能，充電時間といった商品性能を実現しつつ，安全性能，信頼性能，高寿命，低重量を満足するよう材料選定や部品配置の最適化を目指した。本稿では，安全信頼性能の一つである耐振動性能開発について紹介する。高電圧電池パックは多数の電子部品から構成されており，振動伝搬が複雑化している。そのため，それぞれの部品の耐振動性を保証しながら最適な部品配置を実現できる開発と解析精度の向上が必要である。

振動開発では，振動の伝達を考慮した各部位への共振周波数のコントロールを決めた。そして，モデルを活用した振動に対するレイアウトの開発要素を見定め，応力を低減する形状・締結方法などに変更した。更に，実機の振動評価のコリレーションを行いモデルに反映できていない部分を見極め，より実機に近いモデルで解析することで耐振動性能の高い高電圧電池パックを開発した。

Abstract

Mazda has been promoting a multi-solution strategy responding to each country's demand, considering CO_2 emissions throughout the life cycles of vehicles. This time, we have developed Mazda's first mass-produced BEV, MX-30, which is the first step for carbon neutrality. The high-voltage battery installed in the MX-30 satisfies customers' requirements by optimizing the materials and layouts, including safety and reliability performance, long life, low cost, and light weight, while realizing product performances such as mileage, driving dynamics, regeneration performance, and charging time.

This technical report introduces the development of vibration resistance that is one of the safety and reliability performances. The high-voltage battery pack is composed of many electronic components, which complicates the vibration propagation. Therefore, it was necessary to establish a development process for the optimum components layout while guaranteeing the vibration resistance of each component and to improve the accuracy of analyses. As a vibration-resistance development process, taking into consideration of the way of vibration transmission, we have defined the concept of controlling resonance frequencies transmitted to each component, then determined Weak-Points of the layout against vibrations by using models, and changed the shapes and fastening methods of the components to release stress. We have also performed vibration evaluation to examine correlations between predictions made by a model and results gained on actual machine, and identified areas not reflected in the models. As a result, we have developed a high-voltage battery pack with high vibration resistance through analyses using the model which was closer to the actual machine.

Key words : Battery Technology, Frequency Analysis, Modal Analysis, Body Vibration While Driving, CAE

*1〜2　電子性能開発部
Electrical & Electronics Performance Development Dept
*3〜4　MBD 革新部
MBD Innovation Dept.
*5　マツダ E&T　CAE 技術推進部
CAE Technology Promotion Dept.

1. はじめに

MX-30 に搭載する高電圧電池パックは，電池モジュールをはじめ，電池の状態を監視・制御するコントロールユニット，高電圧回路の起動遮断を行うジャンクションボックス，電池を適温にコントロールする冷却配管や電池ヒータなどさまざまな部品から構成されている。車両の使われ方や保証すべき耐久性能を見定め，振動試験条件を設定し，各部品に対して異常な共振をさせない構造を検討している。

また振動開発では，路面から車両，電池パック，内部部品への振動伝達や部品に加わる応力・加速度を実機やCAE を用いて解析している。それらのデータや結果を活用し，車両やユニット設計（モデル作成）段階で，電池パック全体に対する振動増大・応力集中箇所などを事前に把握し，振動を抑える対策や重量の最小化を行っている。更に，実機による対策の妥当性を検証し，CAE モデルに反映することで解析精度を向上させている。

2. 耐振動の保証方法

2.1　共振周波数

あらゆる物体は最も振動が増幅される共振周波数をもっている。例えば，部品を固定させるブラケットを作成するとき，部品とブラケットの共振周波数が近いと部品の振動がブラケットの共振の影響を受けて増大する可能性がある。このように接続する部品ごとに共振周波数を近付けない考え方を MX-30 の電池パックのレイアウト設計に用いている。

具体的に考慮すべき部品の共振周波数について説明する。走行時における振動の伝達は，路面→サスペンション→車体→電池筐体→ブラケット→電子部品とされていく（Fig. 1）。

MX-30 の電池パックは，車体共振，電池筐体共振，ブラケット共振，各電子部品（例えば電池）の共振がそれぞれ重ならないように設計し，過大な振動加速度を抑制している（Fig. 2）。 車両の特性として 10〜15Hz と低い領域に車体の共振が表れ，周波数が大きくなるにつれて振動加速度は小さくなるため，各部品の共振周波数をより高周波数域へシフトさせることで電池パック内部部品の加速度を抑えることができる。

部品の共振周波数は，式(1)によって決まる。

$$\text{周波数 } f\text{[Hz]} \text{ の式：} f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \qquad (1)$$

m：部品重量［kg］

k：ばね定数

共振の影響を抑制する方法として部品の材料特性変更，搭載位置や固定箇所・数の変更などといった方法がある。

電池パックに搭載する全ての部品の振動加速度が，各部品の保証する耐振動性条件の範囲内であれば，電池パックに対する耐振動性保証ができる。

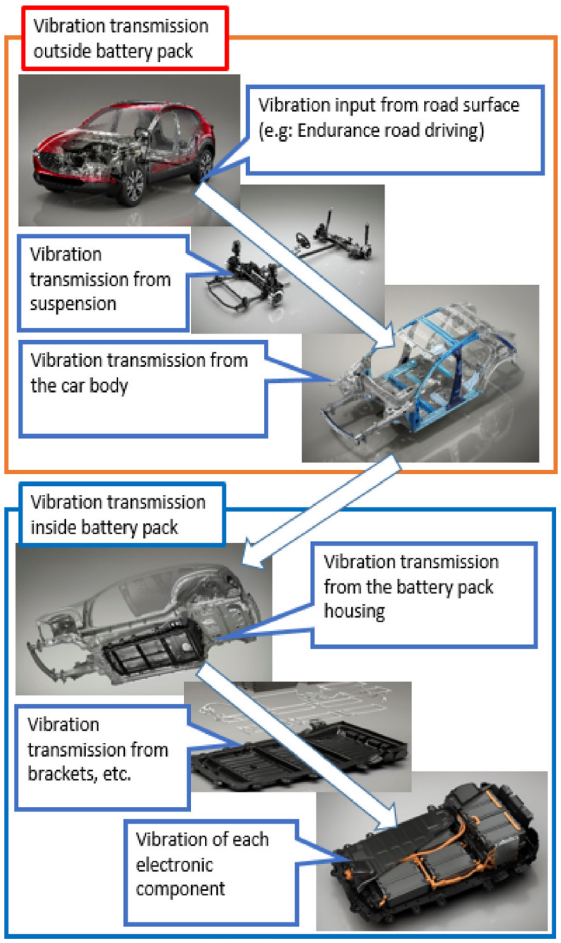


Fig. 1　Vibration Transmission from Outside of Vehicle to Battery Pack

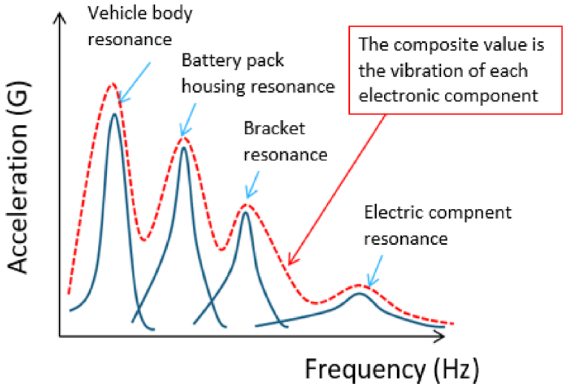


Fig. 2　How to Divide Resonance of Each Part

2.2　耐応力

（1）S-N 曲線

耐振動性を保証するにあたり，振動の繰り返しにより部品に発生する応力が疲労寿命を上回り，変形や破壊に至らないか検証している。S-N 曲線は金属材料や種類で特性が異なる[(1)] ため部品に使用している材料を細かく分類して比較する必要がある。また，アルミニウムなどの

非鉄金属は疲労限界が存在しないものもあるため，以下のやり方を採用した。

繰り返し回数に任意の値（鉄の疲労限回数程度）を与え，それに対し各部品のピーク応力が許容応力以下とすることで，振動ダメージに対する部品信頼性を保証した（Fig. 3）。

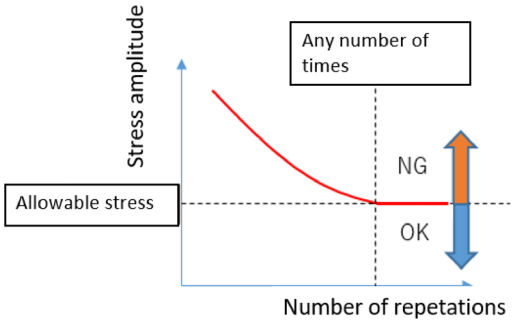


Fig. 3　Relationship between S-N Curve and Allowable Stress

（2）ダメージ量の算出

S-N 線図は規則的な繰り返し（一定加速度の）振動に対する応力の関係を表すが，実際の電池パックの振動加速度は刻一刻と変化し続けるため，実機結果を S-N 線図に当てはめることができない。そこで，社内テストコースの走行データを用いて電池パックに生涯で入力される振動総ダメージ量を用いた。式(2)に総ダメージ量を与えると，繰り返し回数と 1 回あたりの振動加速度の関係が決まる。

$$\text{振動ダメージの式：} D = \sum_{i-1}^{n} \sigma_i^m T_i \qquad (2)$$

σ：加速度［G］

T：加速度が σ のときの回数

m：特定の疲労メカニズムに関する材料定数

ダメージ量を計算する過程で，市場のさまざまな振動を模擬した試験路走行を行い，発生するランダム実働波形の振動から特定入力加速度を決定している。

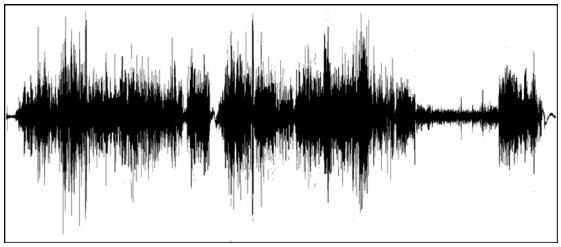


Fig. 4　Endurance Test Road Vibration Waveform

Fig. 4 はランダム実働波形を示している。この波形の疲労寿命予測を行うために，応力・ひずみ頻度の計数手法の一つであるレインフロー法を適用して入力加速度回数を算出している。

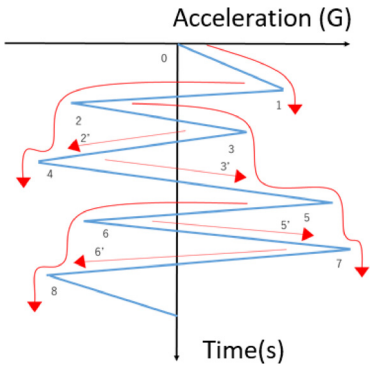


Fig. 5　Random Working Waveform to which Rainflow Method is Applied

レインフロー法は別名「雨だれ法」とも呼ばれている。計数条件として Fig. 5 に示す 2’，3’，5’，6’ のように流れが止められる場合，及び 1，4，7，8，のように流れが止められずに底なしで水が流れ落ちる場合，その水が流れた横方向の長さが半サイクル分の波の全振幅（振動加速度）としてカウントする。振動加速度とカウント数を式(2)へ代入し，社内テストコース走行時のダメージ量を算出した。

2.3　認証試験（振動）について

開発したクルマをお客様へお届けするために市場環境適合性を確認する認証試験を受験している。認証試験については 2021 年 EU 仕向け：UNR-100，中国仕向け：GB 規格（GB38031）の 2 つがあり，いずれも電池パックに対し実施する規格となっている（Table 1）。

Table 1　List of Vibration Test Conditions

UN R100　(Vertical direction)

Frequency (Hz)	Accelaration(m/s²)
7-18	10
18-30	10-2
30-50	2

GB38031　(lateral direction)

Frequency (Hz)	PSD(m/s²)²/Hz
5	0.576
30	0.576
200	0.003
RMS	4.9　m/s2

GB38031　(Longitudinal direction)

Frequency (Hz)	PSD(m/s²)²/Hz
5	0.192
10	0.480
20	0.480
200	0.014
RMS	4.41　m/s2

GB38031　(Vertical direction)

Frequency (Hz)	PSD(m/s²)²/Hz
5	1.441
15	1.441
65	0.096
100	0.096
200	0.010
RMS	6.272　m/s2

マツダでは走行時の振動波形を測定しており，搭載位置ごとに電子部品の振動評価条件を決定している。UNR-100 や GB 規格に対し，車両走行時の電池締結部への振動加速度がそれ以上になっており，かつ極端に大きい振動加速度が入っていないことを確認することで，認証試験の耐振動性を保証するとともに，振動評価条件の確からしさを確認している。

3. MX-30 電池パックの耐振動開発

3.1　電池パック内レイアウト

電池パック内レイアウトを決定する上で，スペース内に電池を詰め込むエネルギー高密度化と同時に，共振や応力集中させないブレークスルーが必要であった。本章では具体的に電池パックに折り込んだ技術を説明する。

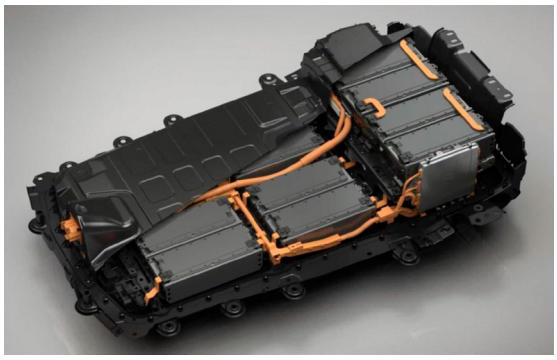


Fig. 6　MX-30 High-Voltage Battery Pack

Fig. 6 に MX-30 の電池パックを示す。本電池パックは耐振動技術として以下（1）～（4）を折り込んでいる。

（1）電池モジュールの配置

電池モジュールとは電池セルを直並列につなげた集合体のことである。MX-30 では 1 モジュールあたり電池セルが 12 個（6 直列 2 並列）で接続している。筐体に搭載する電池モジュールは左右対称にすることで重量の偏りをなくしている。これにより振動時のねじれを抑え，電池パック全体にかかる応力を均等に分配している。後部の 2 段積の電池モジュールが 2 個なくなった場合，後部モジュールにかかる加速度が 1.3 倍程度に増幅されてダメージが増えることを実機で確認しており，現在のレイアウトが最適と考える。

また，電池の上部にジャンクションボックスとコントロールユニットといった電子部品を置かない構造にすることで，共振の重なりを物理的に起こさせないようにし，部品の過大ダメージを防止している。

（2）高電圧バスバーの形状

高電圧バスバーは電池モジュール間をつなぐ部品であり，Fig. 6 のオレンジ色の部品である。隣り合う電池端子を互いに接続するとき，締結位置ばらつき（電池モジュールの搭載位置のばらつき）により締結部に発生する応力に加え，充放電時の膨張収縮や振動，衝撃に対する応力を分散させるため，曲げ形状のバスバーを使用している。上段 - 下段のモジュールをつなげるバスバーは，伸縮自在なバスバーケーブルを使用している。またバスバーケーブルは，電池端子への応力を下げるため，固定時の反力の低いケーブルカバーの採用や，上下に振れにくい位置で固定させるなどの工夫を凝らしている。

上記（1）（2）は技術開発における限界（破損させるまでの耐久）試験により，対策する箇所を把握することで耐振動構造仕様に落とし込み設計をすることができた。これらを電池パックに実装することにより，市場耐振動性保証目標を大きくクリアし，お客様にいつまでも安心してお使いいただける電池パックを開発した。上記①②は技術開発における耐久試験により，応力がかかりやすい箇所を把握することで対策内容を決めている。これらを電池パックに実装することにより，市場の耐振動性保証（走行可能距離）目標の 4 倍相当を保証している。

（3）ブラケット形状の最適化

ジャンクションボックスとコントロールユニットそれぞれを固定させるブラケットを設計しており，重量の低減をしつつ，耐振動性能を悪化させない手段について解析ベースで検討した。Fig. 7 にジャンクションブラケットの最適化に関する検証内容を，Fig. 8 にコントロールユニットブラケットの最適化に関する検証内容を示す。

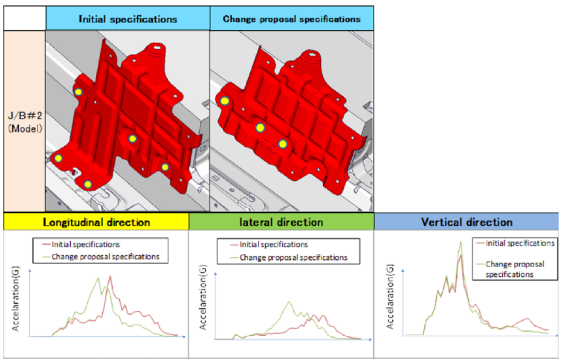


Fig. 7　Considering Design Change of Junction Box Bracket

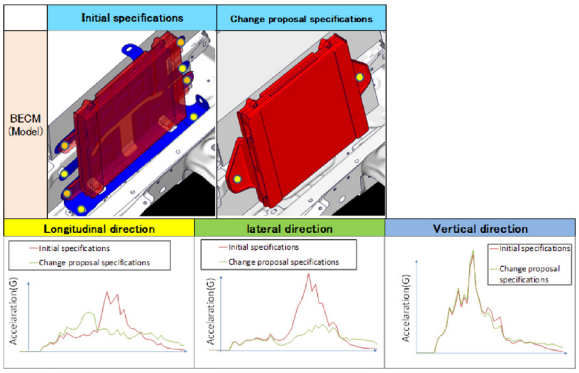


Fig. 8　Considering of Control Module Bracket Less

Fig. 7，8 に示すグラフは車両も含めた振動解析結果であり，振動加速度はほとんど変わらない，もしくは低下することから，いずれもブラケットの形状や締結点の変更による悪化はないと考える。

Fig. 8 に示すコントロールユニットのブラケットレスについては，締結箇所周辺の剛性を向上させたことにより，車両前後左右方向に対しての振動加速度を低減させることができた。また，この 2 つの対策により，約

0.9kg の軽量化を行うことができた。

（4）冷却配管の 2 階建ての形状変更

電池パックには，電池温度を最適にコントロールするため，電池パック筐体下側のロアケース上に冷却配管を設置している。電池冷却配管は各電池モジュールの底面をとおるように設計しているため，電池モジュールの 2 段積構造において，下段と上段の位相差により冷却配管に加わる応力を低減させることが課題であった。

Fig. 9 に冷却配管構造を載せる。この課題に対して以下①②の対策を折り込んだ。

①ロアケースから上段の電池冷却配管へ分配するディストリビュータを，共振時上段の電池の位相に近い箇所に締結することで引っ張り圧縮を抑え，ねじれが発生しにくい角度で締結することで応力を低減させた。

②上段から下段へ向かう冷却配管はゴムを採用し，左右にクロスさせることで，上下方向から加わる応力を低減させた。これらの対策により耐振動性の優れた 2 段積電池の冷却構造を実現させた。

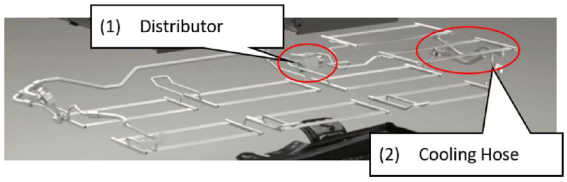


Fig. 9　Battery Pack Cooling Pipe

3.2　電池パックの CAE モデル

解析精度向上にあたり，モデル上での実機の再現性とメッシュ細分化が必須となるが，精度や解析時間の寄与度を考えて適度なレベルに調整する。そこで，さまざまな形状の電池パックや電子部品に対し，振動評価やハンマリング評価を行い，CAE モデル精度の妥当性検証を行った。

解析精度向上のため，上下／左右／前後 3 軸方向に対しての掃引振動を与え，各部位の伝達経路ごと・周波数ごとの振動伝達特性を評価することで解析とのコリレーションを行った。予測精度が低い箇所については原因分析を行った上でモデルを最適化していくことで，予測精度を向上させ，耐振動性能の優れた高電圧電池パックを開発した。

Fig. 10 に電池パックの解析モデルを示す。電池モジュール，コントロールモジュール，バスバー，ジャンクションボックス，サービスプラグなど電子部品はモデル上で実機の形状を再現させており，電子部品の振動加速度を表現・再現ができている。

解析精度や振動保証への影響の小さい電池内部（セル）は重量のみをモデル化し，一方で応力が集中する電池締結部位は詳細までモデル化させることで，解析時間を抑えつつ必要な箇所の精度を上げる工夫を行っている。

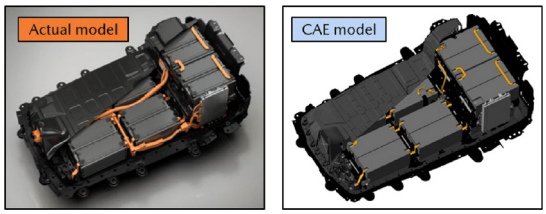


Fig. 10　MX-30 High-Voltage Battery Pack CAE Model

4. おわりに

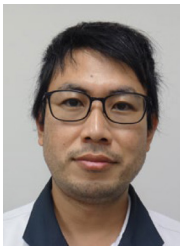
本稿で紹介した耐振動のモデルベース開発により，早期に振動対策を折り込み，設計検討段階から重量最小化ができるようになった。

MX-30 は，マツダ初の量産電気自動車であると同時に，初めてこの開発手法を採用した車両であり，実機の耐久テストにおいてこの効果を確認している。今後もこの手法を発展させ，マツダの電気駆動車両を安心安全なものとして全てのお客様に届けていきたい。

参考文献

（1）社団法人　日本材料学会：材料強度学（2004）

■著　者■


伊藤 智昭

丹羽 貴大

花田 裕

岸田 直樹

鍋島 範之

特集：MAZDA MX-30

11

MX-30 BEV & B ピラーレスボディー開発

Development of BEV Model and B Pillarless Body Structure for All-New Mazda MX-30

山田　守英 *1　松田　大和 *2　久保田　陽満 *3　銭谷　恒明 *4
Morihide Yamada　Yamato Matsuda　Harumitsu Kubota　Tsuneaki Zenitani
森本　誠 *5　三石　直人 *6　後藤　英貴 *7
Makoto Morimoto　Naoto Mitsuishi　Hidetaka Goto

要　約

新型 MX-30 EV MODEL は，MAZDA3・CX-30 に続き，車両構造技術 SKYACTIV-VEHICLE ARCHITECTURE をベースに，フロア下にバッテリーを搭載し，RX-8 以降，約 20 年振りとなるフリースタイルドアを採用したマツダ初の量産電気自動車（BEV）である。バッテリー搭載による従来モデルからの大幅重量増並びに B ピラーのないボディー構造において，他のマツダ車同等の高い車両性能を実現した。本稿では，バッテリー筐体をボディーの一部ととらえ，ボディーとともに強度・剛性を向上させる工夫，B ピラーのないアッパーボディーにおける強度・剛性を向上させる工夫，バッテリー・フリースタイルドアを含めたボディーの振動伝達特性の開発など，MX-30 BEV のボディーシェル開発について紹介する。

Abstract

The All-New Mazda MX-30 BEV is the first BEV mass-produced by Mazda Motor Corporation. Following the Mazda3 and the Mazda CX-30, this model is based on Mazda's vehicle structure technique Skyactiv-Vehicle Architecture and carries a battery under the floor. And the freestyle door has been adopted for the first time in about 20 years since the Mazda RX-8.

With the body structure without a B pillar or a large weight increase from the conventional model due to battery deployment, the Mazda MX-30 realizes vehicle performance equal to other Mazda models.

This report introduces body shell development for the Mazda MX-30, including the way of improving the body strength and rigidity by utilizing the battery case as a part of the body shell structure, the way of improving the upper body performance without B pillar structure, and the development of vibration transmission characteristics in the body shell including the battery and the freestyle door.

Key words : Vehicle development, Platform, Body structure/body design

1. はじめに

新型 MAZDA3 に始まる車両構造技術 SKYACTIV-VEHICLE ARCHTECTURE[(1)] は，従来の部品ユニットやシステムの概念を超えて車全体で最適化や理想の考えを進化させ，飛躍的な性能向上を実現した。MAZDA3 と同じ small-PF をベースにする MX-30 においても，マツダが追求する「走る歓び」を同じように体感できるよう開発した。エンジンやモーター，異なるパワーソースにおいても，大型バッテリーの搭載有無により生まれる大幅な車両重量差においても，同体質の特性をもつボディーを実現すべく，Mild Hybrid と BEV のプラットフォームは同時に開発した。

また，開放的な空間と流麗なスタイリングを B ピラーレスボディーの採用で実現し，BEV ではバッテリーパックを車両性能へ最大活用した。本稿ではそれらの取り組みについて紹介する。

2. BEV 対応ボディー

2.1　バッテリーパック搭載構造

BEV のプラットフォームは，MAZDA3・CX-30・MX-30 Mild Hybrid で多くの部品を共用するベースモデルの

*1〜7　ボデー開発部
Body Development Div.

プラットフォームから派生させている。フロントフロア部は，バッテリーパックをレイアウトすることから，ベースとの構造の違いに大きな特徴をもつ。高電圧部品であるバッテリーパックは，キャビンの外側にレイアウトしている。これは衝突時に乗員が高電圧部品に直接接触し感電するのを防ぐことを目的としている。また，フロントフレームやサイドシル，フロアフレームといった骨格部材よりボディー内側に配置し，衝突時の変形が及びにくい部位にレイアウトし保護する考え方である。

また，側面からの衝突に対しバッテリーパックをレイアウトするボディー中央部の変形を抑制するため，従来車のトンネル部にあたる湾曲形状を廃止し，フロア上のクロスメンバーは左右サイドシルをストレートにつなぐ構造とした（Fig. 1）。

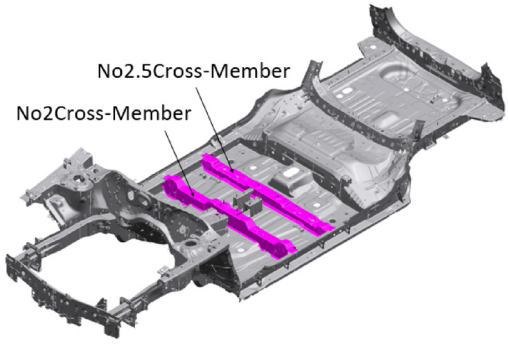


Fig. 1　Straight Cross Member

トンネル形状の廃止によりフロア中央部の上下剛性が低下する。その機能を補うべく，フロア前後をつなぐセンターレインをボルトアップ結合する構造を採用した。更にセンターレインとシートの土台となる各クロスメンバーとの結合部を強化することで，従来車同等のシート取り付け部剛性を確保した（Fig. 2）。

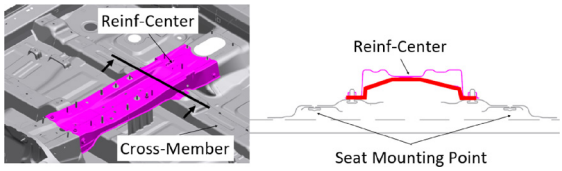


Fig. 2　Reinf-Center

2.2　バッテリーパック結合部構造

BEV のプラットフォームで最も重要視した機能の 1 つに，重量物であるバッテリーパックの保持がある。300kg を超えるバッテリーパックを保持する構造について紹介する。

バッテリーパックはフロア中央部を囲うように，主に左右のフロアフレーム，No.4 クロスメンバーに計 20 か所で締結する。そのうち 14 か所は，フロントとリヤの前後を連結するフロアフレームへの締結であり，バッテリーパックのサイド部を締結している。これらの部位には，主に車両上下方向の荷重と車両前後方向軸まわりのモーメント荷重が負荷される。締結部に必要な強度・剛性をより効果的に確保するため，パイプ材を骨格とするフロアフレームの断面全体で支える構造とした。こうすることで，締結面の局部変形や応力集中を抑制しつつ，ボディーとバッテリーパックを強固に結合した（Fig. 3）。

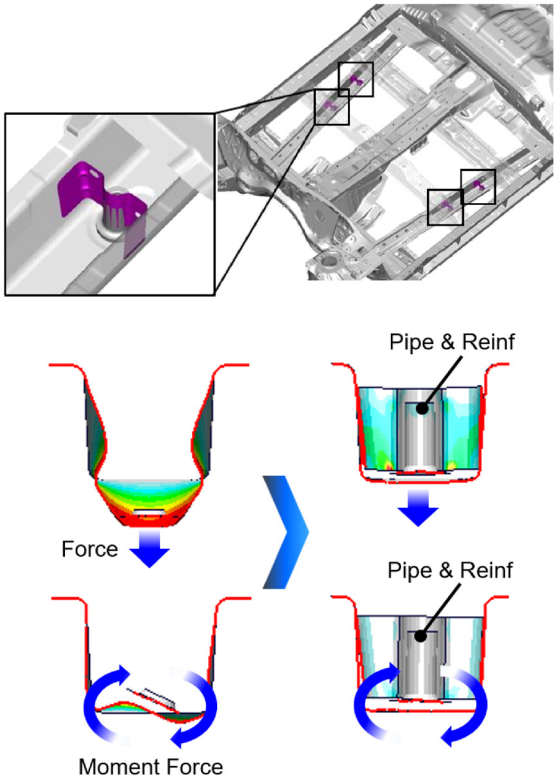


Fig. 3　Battery Pack Mounting Structure

2.3　バッテリーパック活用によるボディー剛性向上

ボディーはドライバーの操舵によって生じるサスペンションからの入力に遅れなく応答し，ドライバーに伝えなければならない。BEV はベースモデルより車両重量が約 200kg 重く，サスペンション支持部をはじめボディー全体にかかる入力もベースモデルより大きくなる。BEV ではバッテリーパックをボディー骨格の一部として活かし，四輪対角剛性に代表されるボディー剛性を向上させた。

バッテリーパックの土台であるロアケースは，内部に 3 本のクロスメンバーを配置する。クロスメンバーの延長線上をパイプ材と高強度ボルトでボディーと結合する。

これらとフロントフロアに配置した 2 本のクロスメンバーから環状構造を形成し四輪対角剛性を向上させた（Fig. 4）。

また，リヤサスペンション固定部前方を補強しつつロアケースと結合し，後方のリヤフロア部クロスメンバーとロアケース後部を結合，環状構造とすることでリヤサスペンションの支持剛性を高めている（Fig. 5）。

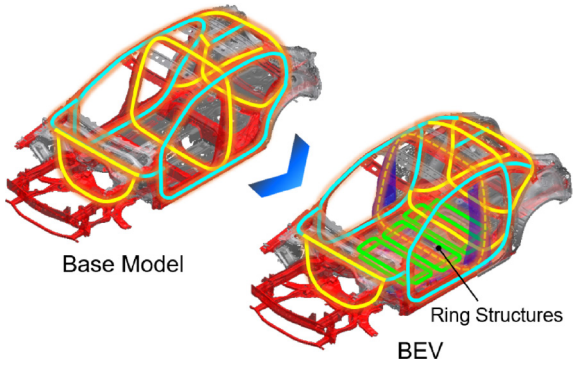


Fig. 4　Ring Structures

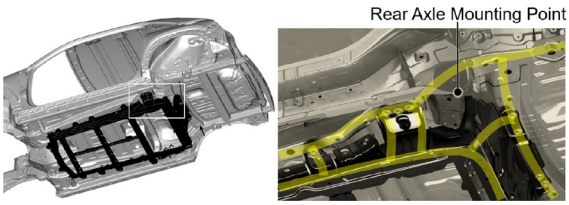


Fig. 5　Rear Axle Mounting Structure

2.4　入力点剛性の同体質化

ベース車からの重量増に伴い，サスペンションのばねは固くしている。これに対し，ボディーはサスペンションがしっかり機能するよう支持部剛性を向上させ車両へのスムーズな入力伝達を実現した。

リヤサスペンション支持部を形成する構造において，入力方向に対して変位を抑制するビードや座面形状の造りこみを行い，入力点剛性（車両左右方向）を向上させた（Fig. 6-a）。

リヤスプリングを支持する構造においても，同様の造りこみを行い，入力点剛性（車両上下方向）を向上させた（Fig. 6-b）。

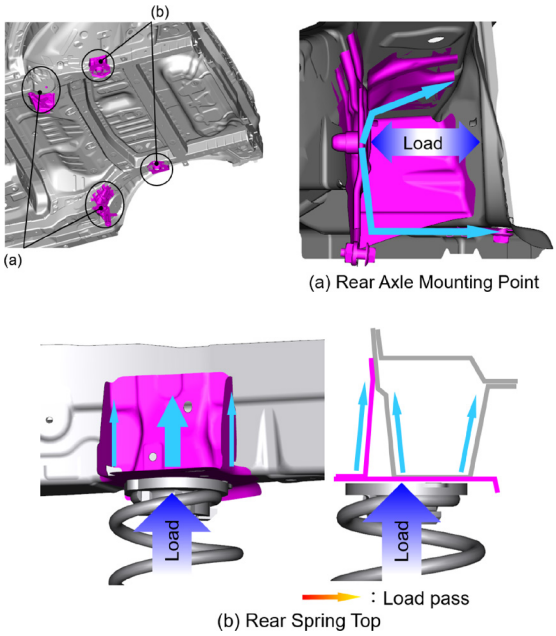


Fig. 6　Rear Suspension Mounting Structure

3. B ピラーレスボディー

MX-30 の大きな特徴であるフリースタイルドアに対応したボディー構造の工夫について紹介する。

フリースタイルドアの採用，すなわち B ピラーのないボディーでは，一般的に，強度・剛性の低下が心配される。しかし，MX-30 では，通常ドア構造であるベースモデルと同じマルチロードパス，多重環状構造の考えを用いて機能配分を行い安全性，剛性を確保した。

3.1　ハイテン材，ホットスタンプ使用による機能強化

安全性能において，フリースタイルドアに B ピラーの機能を持たせることに加え，ドア開口部を強化している。A ピラーからルーフサイド部につながるアウターレインに 1500MPa 級のホットスタンプ材，インナー側に 1310MPa 級の超ハイテン材を採用した。更に，衝突時の弱点部位となる A ピラーコーナー部を分割することなく一体で設定することで剛性変化を無くし，ドア開口部の環状構造強化と合わせて，必要な強度を確保した（Fig. 7）。

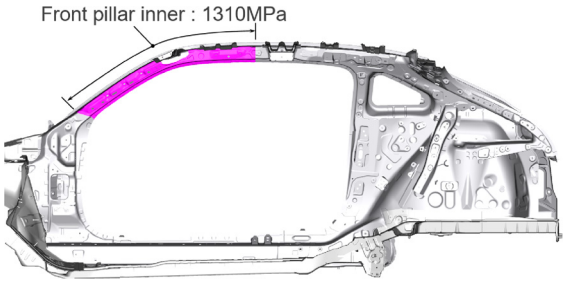


Fig. 7　Cab Side Body Structure

ボディーにおける B ピラー部の機能量が減った分，C ピラーを機能強化した。直立する C ピラーの連続断面化を行い，ドア開口部の剛性を向上した（Fig. 8）。

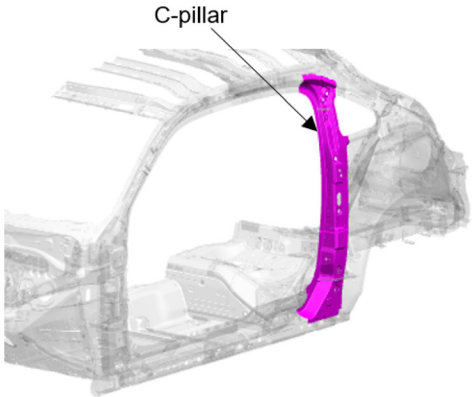


Fig. 8　C-pillar Structure

3.2　ルーフパネル振動抑制

C ピラー強化に伴い，リヤサスペンション入力点からルーフパネルに伝達される振動エネルギーが増加する。

これにより中周波帯域のロードノイズが増幅する。ルーフレインの中央部に集中した振動エネルギーに対し，W型断面のルーフレインを閉断面化することで，振動エネルギーを減衰させロードノイズの悪化を抑制した（Fig. 9）。

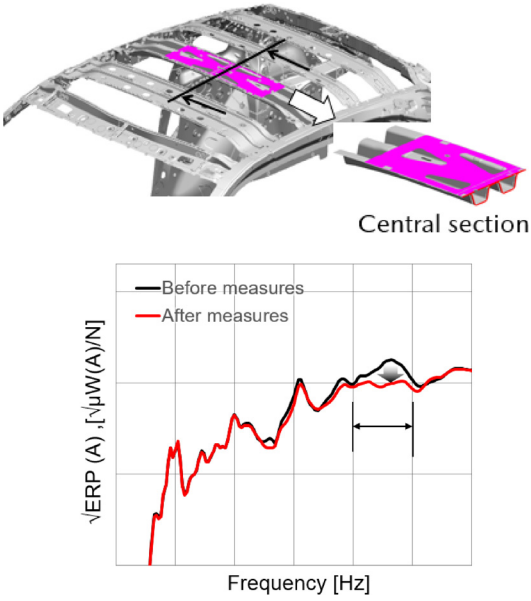


Fig. 9　Road Noise Analysis Results

4. 振動伝達制御ボディー

大重量のバッテリーパックをフロア下に搭載するBEVが抱える問題点として，路面の突起等を乗り越えた時にでる，耳を圧迫するドラミングノイズ悪化が挙げられる。

また，トンネル構造のないBEVのフロアは，ベースモデルに対し，左右のフロアフレーム間のパネル面が広く，フロア振動が大きくなる特徴がある。

これらに対して，単純な剛性UPで対応する従来の手法では，重量が増加してしまうため，バネマスの細分化を行い，振動エネルギーを段階的に分散させることで，問題を解決した。

4.1　振動伝達制御コンセプト

従来は一つのバネマスの関係にあるバッテリーモジュールの振動エネルギーはボディーに直接伝わる。そのため，バネとなっているロアケースの剛性を上げないとエネルギーが低減できず，重量アップにつながる。

これに対し，バネマスの細分化を行い，ボディーへ直結する部分への反力を段階的に分散させることを考えた。

ばねK1がばねK2より一定量低くなることで，振動レベルが低減していく特性をたしかめ，これをコンセプトに車両性能から目標とする剛性比を決定し，ボディーとロアケース，ロアケースとバッテリーモジュールの結合部構造を決定した（Fig. 10）。

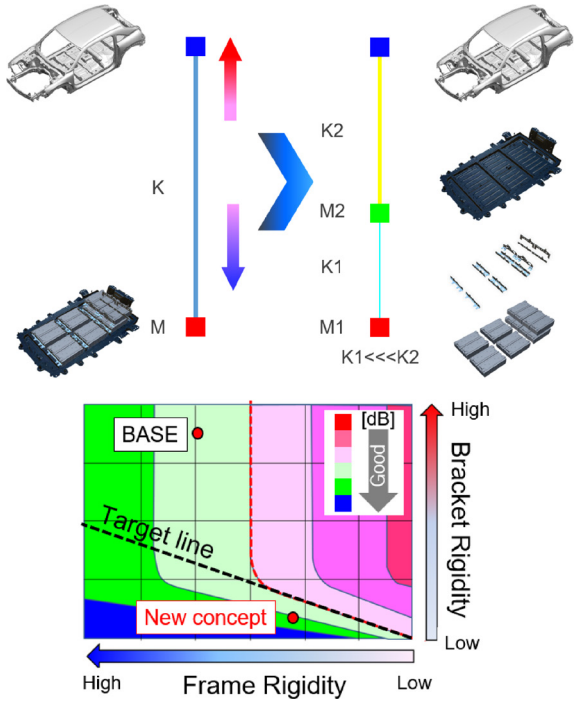


Fig. 10　New Concept of Spring Mass Model

4.2　ボディーとロアケースの結合部構造

重量物であるバッテリーパックは，ボディーの振動抑制に効果的に活用した。

ボディーフレームを介してフロアに伝わる路面振動に対し，伝達経路である左右フロアフレーム，それにつながるロアケースの剛性比をコントロールすることで振動を抑制した。ボディー側の取付け点剛性（k1）に対するロアケース側剛性（k2）の比率を一定値以上大きくすることで，音圧レベルをねらいのターゲットに収めた（Fig. 11）。

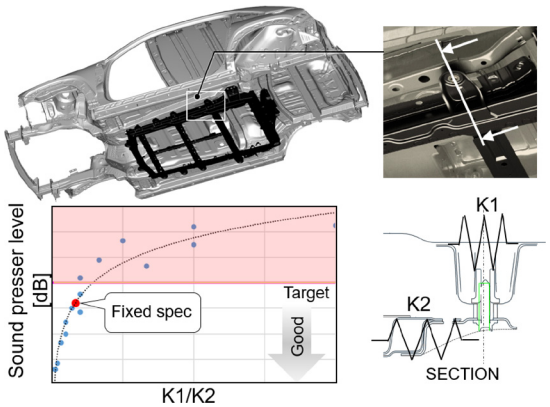


Fig. 11　Control the Rigidity of K1 and K2

構造事例を紹介する。ロアケースは内部クロスメンバーの延長線上にボディーと結合する外部Bracketを設け，Bracketは連続性に留意して形状の造りこみを行った。このように，エネルギー伝達効率を高めることで，フロア振動を抑制しロードノイズを低減した（Fig. 12）。

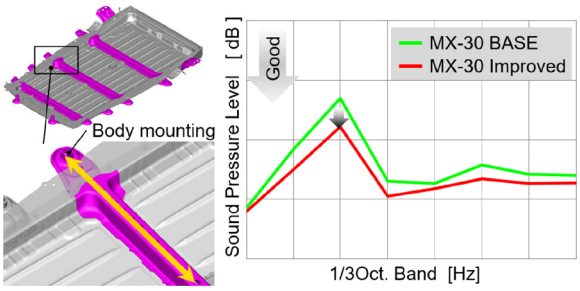


Fig. 12　Coarse Road Noise Comparison

4.3　ロアケースとバッテリーモジュールの結合部構造

バッテリーパック内部に 16 個あるバッテリーモジュールは 2 個を 1 セットにする Bracket を介してロアケースに固定する。

同様の構造で固定することで，バッテリーモジュールの振動特性コントロールと組付性の向上を行った。

一方で，8 セットを同じ振動特性のまま配置すると，共振により大きくなる一部の周波数帯域の振動が，フロア振動も悪化させる。そのため，配置する位置により，この Bracket の形状，板厚，固定点数を変え，共振周波数と振動モードをコントロールした。

こうすることで，フロア振動低減を実現した（Fig. 13）。

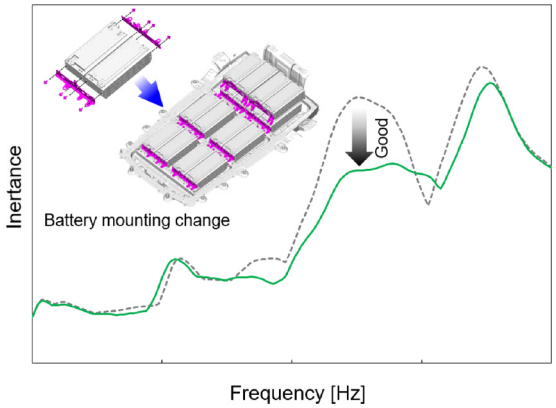


Fig. 13　Floor Vibration

4. おわりに

新型 MX-30 は，車両構造化技術 SKYACTIV-VEHICLE ARCHITECTURE をベースに，Mild Hybrid・BEV の両方で上質な乗り心地や自然な操作性をはじめとする高い運動性能を実現した。この成果は企画やデザインをはじめ，関連部門と高い志を共有し，五位一体（開発・生産・購買・品質・物流）で活動しモノ造り革新を進めた結果である。今後もお客様の期待を上回り，喜んで頂けるよう魅力ある商品開発に尽力していく所存である。

参考文献

(1) 佐藤 健一ほか：新型 MAZDA3 の軽量・高剛性ボディー開発，マツダ技報，No.36，pp.78-82（2019）

■著　者■

山田 守英

松田 大和

久保田 陽満

銭谷 恒明

森本 誠

三石 直人

後藤 英貴

特集：MAZDA MX-30

12

MX-30 の衝突安全性能
Passive Safety of MX-30

濵田　隆志 *1　廣田　和起 *2　河野　勝人 *3
Takashi Hamada　Kazuki Hirota　Katsuhito Kouno
古賀　俊之 *4　石倉　一孝 *5　川船　良祐 *6
Toshiyuki Koga　Kazutaka Ishikura　Ryosuke Kawafune

要　約

マツダでは「走る歓び」と「優れた環境・安全性能」を目標に，安全・安心なクルマと社会の実現を目指した商品開発を実施している。その中で，衝突安全性能開発は，高い安全性能と軽量化という背反傾向にある課題を両立させるために，MBD（Model Based Development）を駆使して車両構造を開発している。SKYACTIV-VEHICLE ARCHITECTURE に代表される車体開発では，高精度 CAE 技術を用いて，衝突時の荷重を効率的に分散させるマルチロードパスを進化させた新しい構造を作り上げた。

Mazda MX-30 は，EV モデルとフリースタイルドアという 2 つのユニークな特徴をもっており，これらの特徴と高い衝突安全性能を高次元で両立させる構造を織込んで，欧州の衝突安全アセスメント（New Car Assessment Program: NCAP）である EuroNCAP で，2020 年に最高ランクの 5★を獲得した。本稿では，代表的な衝突モードである前面衝突，側面衝突，後面衝突，歩行者保護について織り込んだ技術を紹介する。

Abstract

Aiming at realizing safe and secure cars and society, Mazda is striving to achieve “excellent environmental and safety performance” and “driving pleasure”. In crash safety development, Mazda uses MBD (Model Based Development) to develop vehicle structures with the aim to achieve the two conflicting properties, light weight and safety performance, at a high level. In vehicle body development characterized by Mazda’s Skyactiv-Vehicle Architecture, a new body structure was developed by using high-accuracy CAE Technology. This is a structure evolved from the multi-load path structure that efficiently disperses collision loads.

The ALL-New Mazda MX-30 has two unique features: EV model and freestyle door. Coming with the structure that makes these features compatible with high crash safety performance, the Mazda MX-30 got EuroNCAP’s best rating 5★ in 2020. This report introduces the technologies incorporated in typical crash modes of vehicles: frontal impact, side impact, rear impact and pedestrian protection.

Key words : Safety, Passive Safety, Vehicle Development, CAE, EV model, Freestyle door

1. はじめに

交通事故による死者数は，日本では減少傾向にあるが，世界的には依然として大きな社会問題であり，更なる安全性能の向上が求められている。そのため，MAZDA3 以降の新型車では，万一の衝突事故の際に乗員や歩行者をしっかりと保護するため，市場におけるさまざまな事故・傷害形態の分析と人体における傷害発生メカニズム（人間研究）を軸として開発した。

また，深化した魂動デザイン，意のままに操る楽しさを実現するために，最少の潰れストロークを，最軽量で達成するための進化にも取り組んだ。進化のポイントは，理想の車体潰れパルス（減速度）と内装パルスを実現するために，MBD モデルによって，荷重と変位をマルチロードパスで自在にコントロールする技術である。

新型 MX-30 では，新型 MAZDA3[(1)] で衝突安全性能を大きく進化させた新世代車両構造技術 SKYACTIV-VEHICLE ARCHITECTURE をベースとしながら，EV モデルの特徴である大容量のリチウムイオン電池をバッテリーパックとして床下に配置して，衝突時の保護と搭載

*1〜6　衝突性能開発部
Crash Safety Development Dept.

空間を両立させる構造，及び特徴的な構造であるフリースタイルドア採用による B ピラーレスでのマルチロードパスの実現に取り組んだ。

本稿では，衝突安全性能と新型 MX-30 の特徴を高次元で両立させた SKYACTIV-VEHICLE ARCHITECTURE について，代表的な衝突形態である前面衝突，側面衝突，後面衝突，歩行者保護から紹介する。

2. 前面衝突性能開発

2.1　前突時のバックアップストラクチャ構造

MAZDA3[(1)] では衝突時の大荷重を複数の方向に分散させることで効率よく吸収するマルチロードパス構造を採用している。MX-30 ではフロア下にバッテリーパックを搭載するため，側面衝突からのバッテリーパックの保護性能と前面衝突時のロードパス構造，バッテリーパックの搭載空間の確保の両立が必要となった。そのために，前面衝突と側面衝突のロードパスを両立させるトンネル構造と，バッテリーパックの土台であるロアケースを活用した前突マルチロードパス構造の開発に取り組んだ。

（1）前面衝突と側面衝突を両立するトンネル構造

MAZDA3 ではトンネルをダッシュパネルから #3 クロスメンバーまで通すことで，前面衝突時のフロア変形を抑える機能を持たせていた（Fig. 1）。MX-30 では 3.2 節で述べるように側面衝突からバッテリーパックを保護するために，トンネル構造を前側だけ残して廃止しフロア上のクロスメンバーを車両横通しでストレートに通したため，前面衝突時のフロアのピッチ方向のモーメント強度が低下した（Fig. 2）。このモーメント強度を補うため，クロスメンバーをかわしながら，トンネル前側と #3 クロスをレインで前後方向に繋ぐ構造を採用した（Fig. 3）。これにより，前面衝突と側面衝突で必要となる車体強度の確保を実現した。

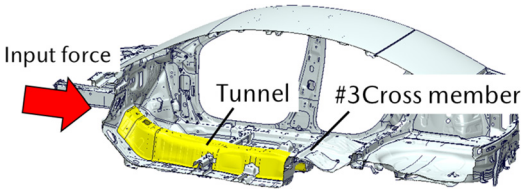


Fig. 1　Tunnel Load Path of MAZDA3

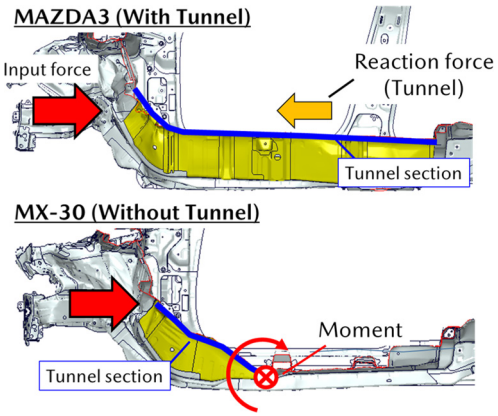


Fig. 2　Comparison of Load Path with Tunnel and without

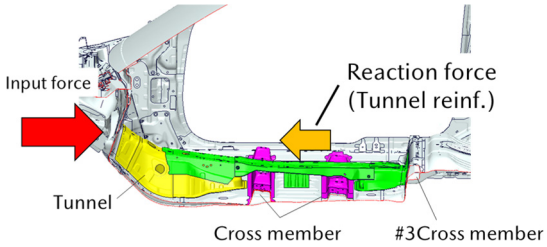


Fig. 3　Structure of Tunnel of MX-30

（2）バッテリーのロアケースを活用したロードパス構造

MAZDA3 では前面衝突時にキックアップが車体中心側に倒れる変形を抑制するために，トンネル下面レインで前後方向の力で支える構造を採用している（Fig. 4）。MX-30 ではバッテリーパックを搭載するために，トンネル下面レインを廃止した。そのため，ロアケースを活用して左右のキックアップ同士をつなげ，トンネル下面レインの前後方向強度と同等の強度を左右方向で支える構造とすることで，衝突性能とバッテリーパックの搭載性を両立した（Fig. 5，6）。

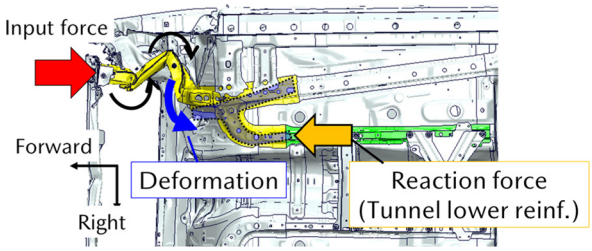


Fig. 4　Tunnel Lower Reinf. of MAZDA3

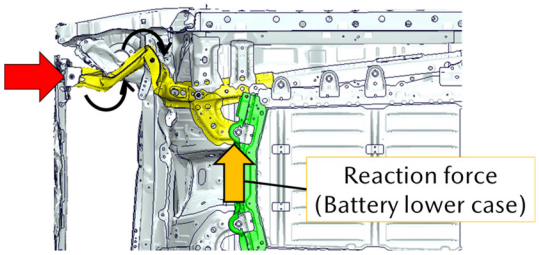


Fig. 5　Battery Lower Case of MX-30

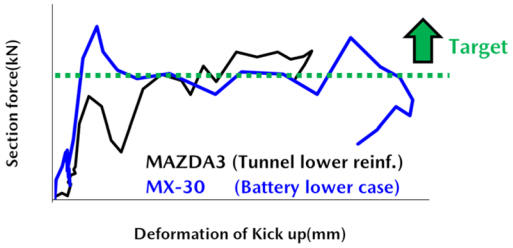


Fig. 6　Comparison of Force-Stroke Curve

2.2　フリースタイルドアと前面衝突性能の両立

スモールオーバーラップ前面衝突では，A ピラーが上方に持ち上げられる方向に大荷重が入り，通常は A ピラーの曲げ強度と B ピラーによる下方向への引張力で，この変形を抑制している（Fig. 7）。MX-30 では B ピラーがないフリースタイルドアを採用しているため，A ピラーに 1500MPa 級のホットスタンプ鋼板を採用し曲げ強度を上げた（Fig. 8）。更に，リアドアラッチをドア開口部の上下に設定し，ラッチレインに 590MPa 級や 440MPa 級のハイテン材を採用して結合強度を上げ，リアドア内には高強度のレインを設定し，A ピラーを下方向へ引っ張る機能をもたせた（Fig. 8，9）。

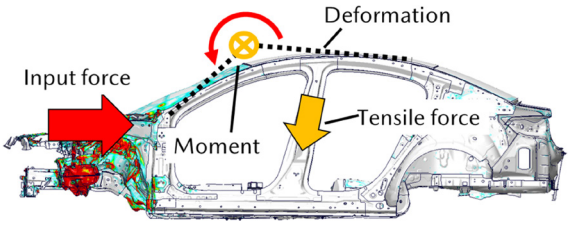


Fig. 7　Load Path for Small Overlap Frontal Crash of MAZDA3

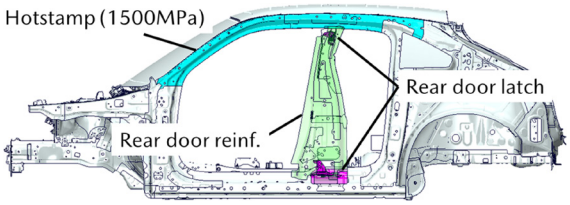


Fig. 8　A-pillar and Rear Door Latch of MX-30

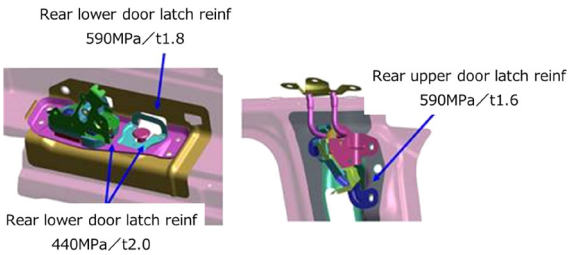


Fig. 9　Door Strikers and Latches Spec

3. 側突衝突性能開発

3.1　フリースタイルドアと側面衝突性能の両立

MX-30 が採用したフリースタイルドアは，側面衝突時の衝突エネルギーを受け止める最重要骨格である B ピラーが存在せず，リアドアを上下のラッチで締結する構造になる（Fig. 8，9）。このような条件下で従来車と同様に乗員を守るためには，ドア変形を最小限に抑えて，ラッチの破断を防止することが必要となる。その対応として，リアドアに B ピラー相当の機能をもたせ，リアドアと車体をラップさせることでラッチへの入力を抑えつつ B ピラーをもつ車両と同じように車体に広く荷重を分散させることができる構造の開発に取り組んだ（Fig. 10）。

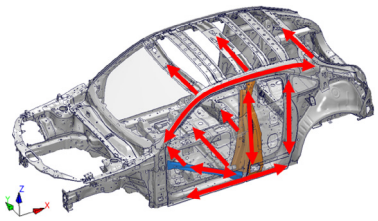


Fig. 10　Load-Path for Side Crash

まず，衝突荷重をドアから車体へ伝達させるために 1500MPa 級のホットスタンプ材の骨格をリアドア内部に設定した。稜線部に追加レインを設定することで，応力集中部を効率的に補強した（Fig. 11）。そしてこの骨格を支持するラッチ & ストライカーには従来車より高い強度レベルをもつ構造を採用することで，ラッチ入力の許容量を上げる対応を取った（Fig. 9）。

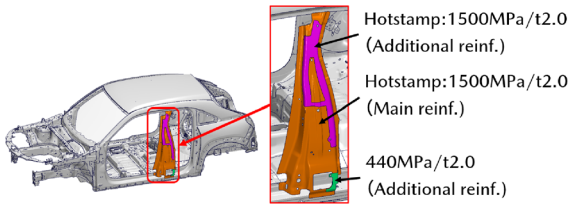


Fig. 11　Vertical Reinforcement

また，ラッチのみに入力が集中するのを避けるため，3 つの構造を採用した。1 つ目にドアからサイドシルへ上下方向の荷重を伝達するロアラッチ横のキャッチャーピン構造を採用，2 つ目にリアドアを受け止め，室内側に荷重を伝達させるためサイドシル上部に補強構造を設定，最後にリアドアへの荷重を抑制するためフロントドアの荷重をサイドシルへ直接荷重伝達できる位置にインパクトバーを設置した（Fig. 12）。

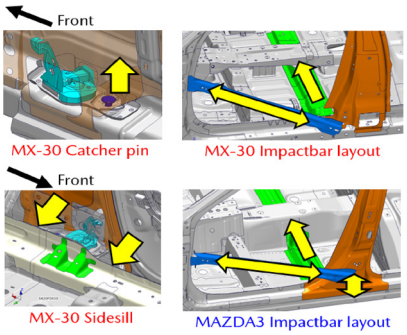


Fig. 12　Sidesill Structure

これらの構造でドアと車体の広範囲で衝突エネルギーを受け止められる車両構造を実現した（Fig. 13）。

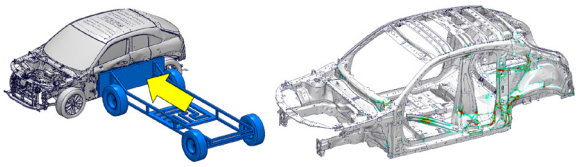


Fig. 13　Side Crash

3.2　EV 化に伴う火災防止対応

MX-30 ではフロア下にバッテリーパックを配置しており，ポール側面衝突のような大荷重が車両に加わる衝突において，バッテリーパックに加わる衝撃力で火災に至らないようにする必要がある。その対応としてマルチロードパスの考えを元に荷重分散させ，ショートストロークで衝突エネルギーを吸収することでバッテリー搭載空間への入力を最小限に抑えバッテリーパックを保護する構造の開発に取り組んだ（Fig. 14）。

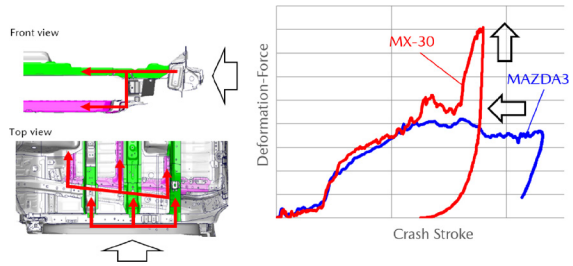


Fig. 14　Load-Path for Side Pole Crash

具体的な構造としてはバッテリーのエリアを守るためストレートなクロスメンバーをフロアに並列に配置し，かつバッテリーパックの土台であるロアケース内にも側面からの入力に耐えるためメンバー構造を織り込んだ（Fig. 15）。

これらの対応により側面衝突に対しても車体とバッテリーケースで前後・上下に荷重を分散させる車体構造を実現させた（Fig. 16）。

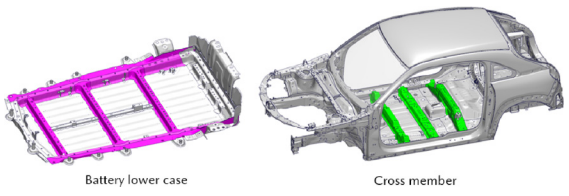


Fig. 15　Battery Protection Structure

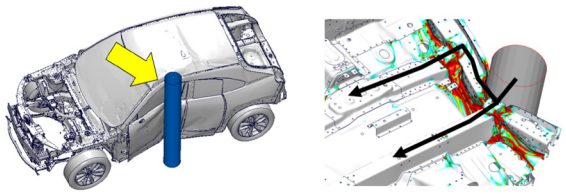


Fig. 16　Side Pole Crash

4. 後面衝突性能開発

MX-30 では，フリースタイルドアであっても従来車と同様に，時速 80km/h で車幅の 70%に可動バリアが追突する衝突モードでもキャビンの変形を抑え，衝突後もドアを開扉できるようにする必要がある。そのために，MAZDA3 で採用した高効率に衝突エネルギーを吸収させるリアフレーム構造を踏襲しつつ，EV モデルにのみ搭載されるバッテリーパックの土台であるロアケースを活用して，荷室空間で高効率に衝突エネルギーを吸収できる構造の開発に取り組んだ。

MAZDA3 を踏襲したリアフレームは，衝突時に蛇腹変形させることで高効率にエネルギーを吸収させるが，意図した変形挙動とするため，MX-30 に合わせて変形の起点となるビードや穴の位置，リアフレームに締結される周辺部品のレイアウトや締結位置を見直した。見直しに際しては，リアフレームの成型過程で生じる板厚変化や加工硬化を考慮した高精度 CAE 技術を用いた。

またリアフレームは，衝突後半のキックアップの持ち上がり挙動により潰れ荷重が低下する傾向がある。そこで，バッテリーパックを保護するため頑丈に作られたロアケースの後ろ側支持構造を No.4 クロスメンバーに取り付けることで，この持ち上がり挙動を抑制し（Fig. 17），潰れ荷重の低下を抑えた。これにより専用の部品を追加すること無く，エネルギー吸収量を MAZDA3 比約 10%向上させている（Fig. 18）。

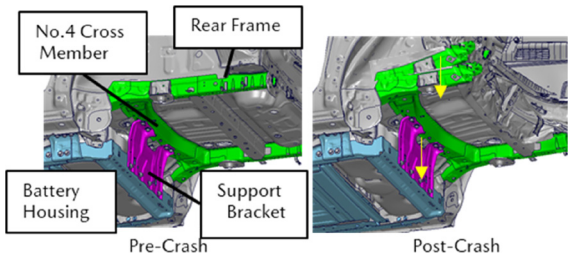


Fig. 17　Crash Behavior of Rear Frame

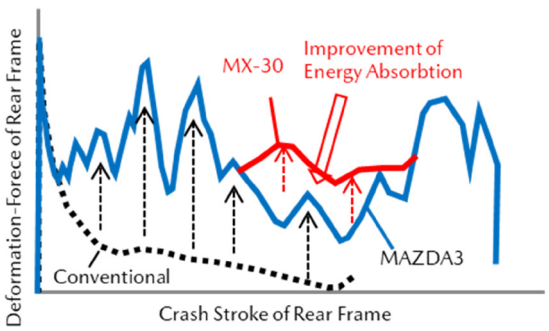


Fig. 18　Energy Absorbing Performance of Rear Frame

5. 歩行者保護性能開発

MX-30 は，ボンネットフードが高い車両で，歩行者との衝突事故の際には，頭部がボンネットフード前側上部

に当たる可能性が高くなることから，ボンネットフードの前方に配置されるフロントグリルアッパー部（以下，グリル UP）の頭部傷害低減構造の開発に取り組んだ（Fig. 20）。

歩行者の傷害を低減するためには，ボンネットやバンパーフェースなどの構造部材の強度を低くして，歩行者を柔らかく受け止める必要がある。しかし，強度を低くした場合，必要なエネルギーを吸収するのに必要となるクラッシュスペースを長く確保しなければならず，デザインやパッケージを成立させるためには最小限のクラッシュスペースでエネルギー吸収することができるような構造が必要となる（Fig. 19）。

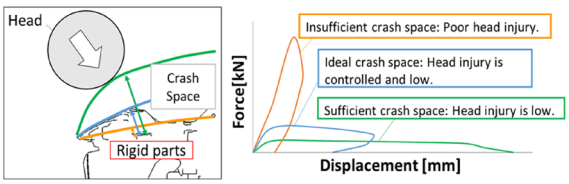


Fig. 19　Head Injury Level in the Crash Space

グリル UP の機能は，①バンパーフェース全体を保持すること，②お客様が手で押した時や走行時の風圧などで塑性変形しないこと，③エンジンルームと外気との遮断の 3 点があり，①と②の観点から一定の剛性・強度をもたせる必要がある。一方，歩行者の傷害を低減するには，前述のとおりグリル UP の剛性を低くしてクラッシュスペースを確保する必要があり，商品性と傷害低減を両立することが必要となる。

外気遮断（前述③）の要求からは，頭部が衝突する領域の剛性は低くてもよいこと，逆にバンパーフェースの保持（前述①）と手や風圧に対する強度（前述②）に対応した支持構造は，頭部が衝突する領域には必要ないが，面として剛性・強度は必要なことに着目し，これらの構造体を 2 つに分けることとした。具体的には Fig. 20 のように，グリル UP の構造部材の上側，すなわち，頭部が衝突する部位は，剛性の低い樹脂（以下，PP）を用いた構造体とし，その下側に剛性の高いグラスファイバー入り樹脂（以下，PP-GF）を用いた構造部材を配置した。

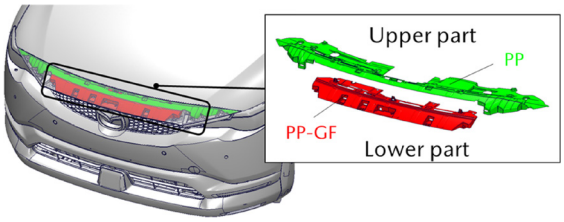


Fig. 20　Front Bumper Grille Upper Structure

これにより前述①，②に必要な剛性・強度を損なうことなく，歩行者頭部を剛性の低い PP 部に衝撃させ，クラッシュスペースを確保し（Fig. 21），商品性と傷害低減を両立することができた。

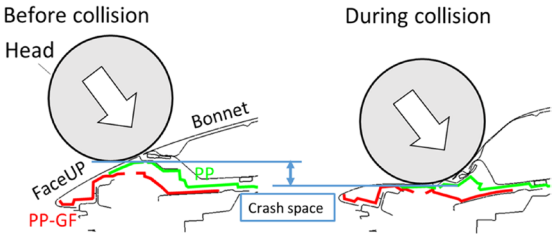


Fig. 21　Deformation of the Grille Upper

6. おわりに

本稿では，新型 MX-30 の衝突安全性能の開発概略について紹介した。昨今の急速な環境規制強化に代表されるように車に対するニーズが多様化する中でも，市場におけるさまざまな事故・傷害形態の分析と人間研究を軸として，新型 MX-30 の成果を基に，より高い衝突安全性能開発を進めていき，今後もお客様によりよい商品を提供できるように努力する所存である。

参考文献

（1）竹村ほか：新型 MAZDA3 の衝突安全性能，マツダ技報，No.36，pp.113-118（2019）

■著　者■

濵田 隆志

廣田 和起

河野 勝人

古賀 俊之

石倉 一孝

川船 良祐

特集：MAZDA MX-30

13 マルチパワーソース車における外観品質の造り込み
Built-In Appearance Quality in Multi-Power Sources Vehicle

石井　哲雄 *1　梶原　彰人 *2　吉崎　真吾 *3
Tetsuo Ishii　Akito Kajihara　Shingo Yoshizaki
江口　覚 *4　中塚　勇輝 *5　山田　孝行 *6
Satoru Eguchi　Yuki Nakatsuka　Takayuki Yamada

要　約

MX-30 はガソリンをパワーソースとするマイルドハイブリッド車と，バッテリーをパワーソースとする BEV（Battery Electric Vehicle）の 2 車種を展開するマツダ初の量産モデルである。それぞれのパワーソースで，共通のデザインコンセプトである「Human Modern」を実現するためには，パワーソースによらず同じ外観品質の完成車を造り込む必要があった。そのため，図面段階から開発・生産技術・製造部門で車体・車両構造差による課題抽出と解決に向けた活動を進め，両パワーソースともに量産車においてねらいの外観品質を実現した。

本稿では，パワーソースにより異なる構造に対して，共通の外観品質を実現するために取り組んだ車体領域の生産技術開発とそのプロセスを紹介する。

Abstract

MX-30 is Mazda's first mass-produced model that develops a Mild Hybrid vehicle that uses gasoline as its power source and BEV (Battery Electric Vehicle) that uses a battery as its power source. In order to realize the common design concept "Human Modern" for each power source, it was necessary to built-in the same appearance quality regardless of the power source. Therefore, from the drawing stage, development and production engineering, production division proceeded with activities to identify and solve the challenges due to differences in body and vehicle structure, and both power sources achieved the desired appearance quality in mass-produced vehicles.

This paper introduces the production technology development and its process that we worked on to realize common appearance quality for structures that differ depending on the power source.

Key words : Battery, Electric, Hybrid, Die, Cam, Stress, Plat Form, Spot Welding

1. はじめに

地球温暖化の抑制のため，世界各国で CO_2 排出量の削減に向けた取り組みが進められている。日本においても 2050 年カーボンニュートラル，脱炭素社会の実現を目指すことが宣言された。マツダも LCA（Life Cycle Assessment）視点で CO_2 排出量削減に取り組んでいる[(1)]。この実現に向けて，自動車のパワーソースの多様化による，適材適所の対応が可能となる開発が必要となってくる。生産技術としても，パワーソースの多様化に伴う構造変更に柔軟に対応しつつ，「走る歓び」を感じるクルマ造りを進化させていく必要がある。本報告では，マルチパワーソース化に伴う，車体領域の課題と，その解決に向けた取り組みについて紹介する。

2. ボディーサイドのデザイン等価実現と金型造り

2.1　ボディーサイド構造とプレス量産準備

MX-30 にはマイルドハイブリッド車と BEV の仕様があり，Fig. 1 に示すようマイルドハイブリッド車ではボディーサイドの左側に給油口・右側に開口なし，BEV ではボディーサイドの右側に給電口・左側に開口なしの設定となる。そのため，サイドフレームアウターに開口設定あり・なし，左右で開口形状違いが発生する。開口のあり・なしにかかわらず，開口周辺における面位置精度とデザイン面品質を保証し，デザイン面の流れを意図ど

*1〜6　車体技術部
Body Production Engineering Dept.

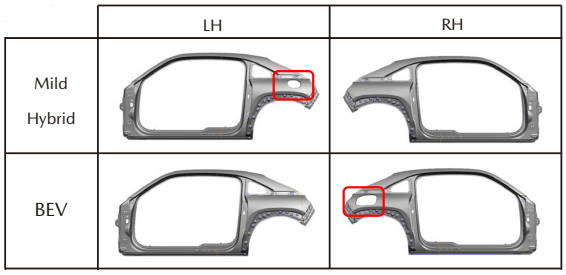


Fig. 1　Type of Side Frame Outer Panel

おりにすることが必要となる。

そのため，従来のプレス工法を前提にすると，開口あり・なしそれぞれで金型を準備する必要があった（詳細は2.2 参照）。MX-30 以降の車種でもマルチパワーソースの設定が想定されるため，今後の共通要素技術として，開口あり・なしパネルを同一型で生産することに挑戦した。

2.2　プレス工法と金型切替え構造課題

開口のあり・なしパネルを同一型で生産するためには，成形有無を切り替えできる金型構造にする必要がある。従来工法では開口の成形を，①絞る⇒②切る⇒③曲げるという 3 工程で行っている（Fig. 2）。

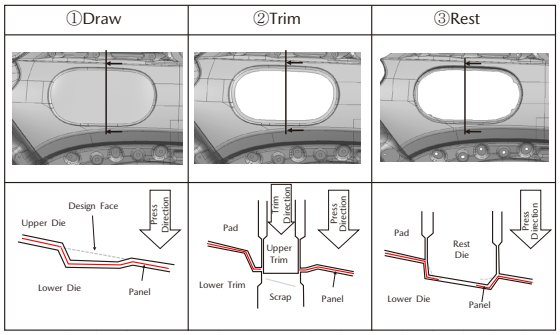


Fig. 2　Conventional Method

開口のあり・なしパネルを同一型で成形するためには，①絞る工程で同じデザイン面を成形し，②切る⇒③曲げるという 2 工程で開口の成形をする必要がある（Fig. 3）。

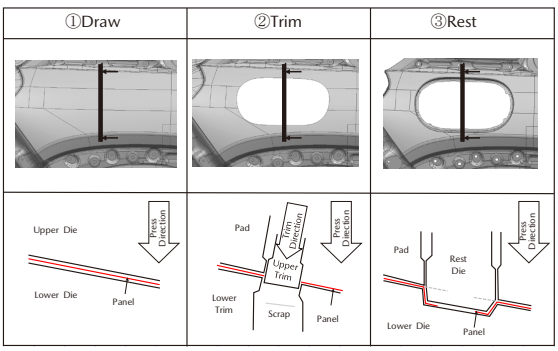


Fig. 3　MX-30 Method

従来工法は開口ありパネルを加工する際，絞る工程でプレス上下方向から切断できる方向に形状を作っている。MX-30 の工法は，絞る工程で開口あり・なしパネルの同じデザイン面を成形することから，開口ありパネルはデザイン面上を切断する必要がある。切断面品質と金型耐久性を満足させるには，デザイン面に対して垂直の方向から打ち抜く必要があるため，プレス加工方向に対して斜めに加工するカムという機構（Fig. 4）を金型に配置する必要があり，金型構造が複雑化する。

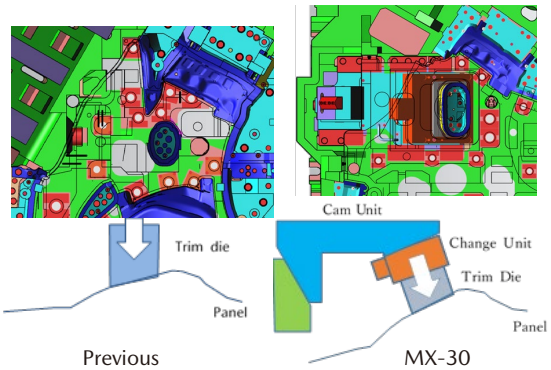


Fig. 4　Difference between Previous and MX-30 Structure

また，従来工法に対して少ない工程数で開口形状を成形することから，Fig. 3 ①のように絞る工程で形状を付与できないため，デザイン面品質保証の難易度が上がる。

これら，金型構造の成立性とデザイン面品質保証について MBD（Model Based Development）を駆使した解決事例を報告する。

2.3　金型構造の成立

開口部の切断面品質と量産での金型の耐久性を保証するため開口を成形する切刃に加えて開口あり・なしを切り換える機構，更にカム機構を収めるスペースを確保しながら，周辺にある既存金型部品とのレイアウトを成立させることが課題となった。レイアウト成立のために金型構造の肉厚や補強リブの位置をむやみに変更し，金型の強度が低下すれば，プレス加工時に発生する力に耐えられず金型破損のリスクが高まる。また，金型破損に至らなくとも金型の剛性が低下し過剰な変形が発生すると，開口部のカエリやデザイン面ひずみなどの品質不良の原因となる。そこで，パネル品質・金型部品のレイアウトが成立する要件を明らかにし，開発・デザイン部門と共創することで，車両要件やデザイン面のつながりを損なうことなく切り換え機構とカム機構が成立する充電口の位置を実現した。金型強度や剛性については，強度解析を用いてプレス加工時に金型に発生する応力や変位量を分析し，金型構造の肉厚やリブ配置の最適化を行った（Fig. 5）。特に成形時にパネルを保持する役割をもつ板押さえ（Pad）については，パネルの保持に必要な圧力源の荷重が金型に加わることを考慮し，圧力源の配置バランスと構造の最適化を行うことで，同一金型で開口あり・なしのサイドフレームアウターを生産する機構を実現した。

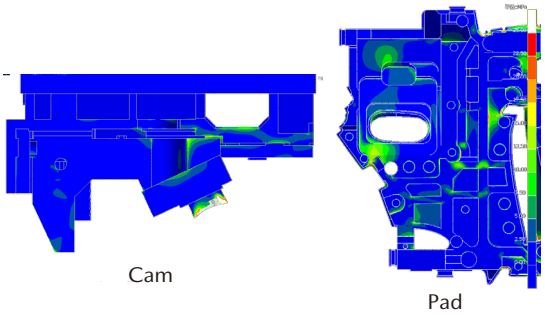
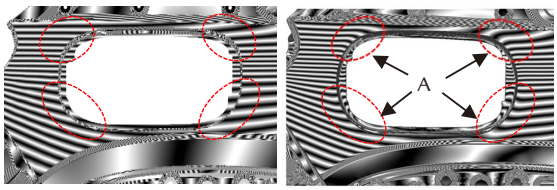


Fig. 5　Stress Distribution of Structure (Cam, Pad)

2.4　デザイン面品質の等価性確保

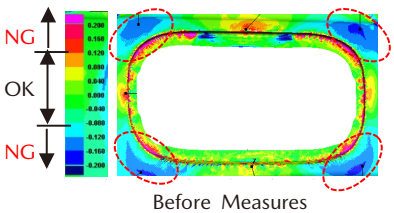
デザイン面品質を保証するために大きな課題であったのが，開口コーナー部（Fig. 6 の A 部）に発生する外板面ひずみ（以下ひずみ）である。ひずみはパネルに光を反射させ，Fig. 6(a)に示すデザイン面データに対する乱れのあり・なしを評価する。Fig. 6(b)は成形シミュレーションを使って成形後の面位置を再現し，光を反射させた図である。



(a)Original Design　　(b)Before Measures Design

Fig. 6　Reflection of Light (Before Taking Measures)

開口の成形過程でパネル内部に発生する応力が駆動力となり，デザイン面を変形させひずみとなる。また，成形完了後の変形が局部的になるほど大きなひずみとして認識される。従来工法は絞る工程と曲げる工程の 2 工程でひずみの起因となる応力を抑制しているが，MX-30 の工法は曲げる工程のみで応力を抑制する必要がある。しかし，曲げる工程だけでは抑制が難しく，適正値を超える応力が発生する（Fig. 7）。（1）成形過程で適正な応力値内にすることと，（2）成形完了後に内板部の広範囲で均等に応力を分布させることで局所的な変形を抑制する，という考え方の基，製品形状工夫による対策を講じた。



Before Measures

Fig. 7　Panel Minor Stress (GPa)

（1）応力値の抑制

成形時に発生する応力は Fig. 8 に示す外郭コーナー曲率（R）・フランジ長さ（L）・成形深さ（D）に起因することがこれまでの活動から分かってきた。

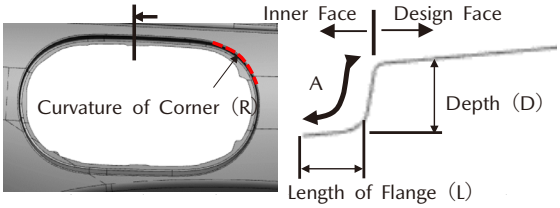


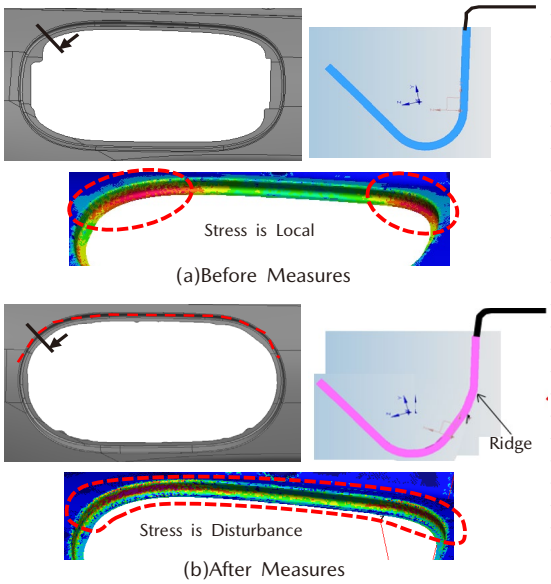
Fig. 8　Part Name

適正な応力値内にするためには成形量を減らすことが有効であり，フランジ長さ・深さの最小化，開口の外郭ラインのコーナー部曲率の拡大が必要だった。また，マツダ量産モデル初の給電口採用にあたり，シール性能や組付け性等の課題もあり，開発・デザイン部門とともに細部に至るまですり合わせを行うことで，製品形状を造り込み，適正な応力値に近づけた。

（2）変形の抑制

従来は（1）の取り組みでデザイン面品質保証することができていた。しかし，MX-30 の工法では適正な応力値内まで至れなかった。そこで，新しいアプローチとして成形完了後の応力分布に着目した局所的な変形の抑制に取り組んだ。

デザイン面の変形を抑制するためには，成形完了後の変形を内板面（Fig. 8 の A 部）の中で留めることが重要である。従来の製品形状はフランジ面からデザイン面の間で稜線が 1 本しか通っておらず剛性が低い。そのため，コーナー部のように成形過程で発生する応力が高い部位では，成形完了後に局所的な変形を発生させてしまう。そこで，コーナーからストレート部にかけて稜線を追加し剛性を付与した。それにより，Fig. 9(b)に示すよう内板部における成形完了後の応力分布を広範囲で均等にし，局所的な変形を抑制した。



(a)Before Measures

(b)After Measures

Fig. 9　Changes of Production & Residual Stress

上記取り組みにより，成形過程での応力緩和と成形完了後の変形抑制することに成功した。これらを量産金型に織り込み，Fig. 10 に示すよう同一型で MX-30 の開口あり・なしのデザイン面品質保証を実現した。

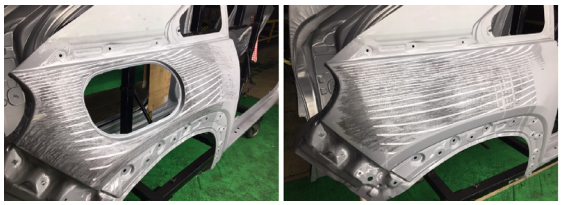


Fig. 10　Reflection of Light

3. マルチ PF における等価品質課題と取り組み

3.1　PF 構造

MX-30 にはマイルドハイブリッドとバッテリーの 2 種類のパワーソースがあり，マイルドハイブリッド車については，これまでのガソリン車の PF を踏襲した構造となっている。一方，BEV はバッテリー搭載性を考慮した PF 構造となっている。そのため，これら 2 つの PF 構造では Fig. 11 に示すように，中央部に位置するフロントフロア構造，フロントシート下の構造に大きな差がある。それぞれのパワーソースにおいて，完成車でねらいの外観品質を実現するためには，車両構造差を踏まえた PF の造り分けが重要となる。

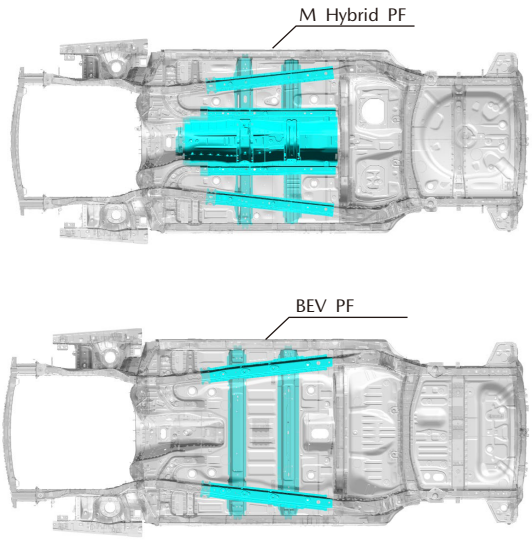


Fig. 11　PF Structure Comparison

3.2　車体 PF 組立ライン概要

車体の PF 組立ラインは大きく 2 つに分けることができる。1 つはそれぞれの部品の関係を治具と呼ばれる要具で位置決めを行い，スポット溶接・プロジェクション溶接などの加工を行う Underbody Tack（Fig. 12，以下，UT）工程，もう 1 つは UT 工程にて部品の相対位置関係が固まった PF に対し，ねらいの剛性・強度を出すための加工を行う Underbody Respot（Fig. 13，以下，UR）工程である。

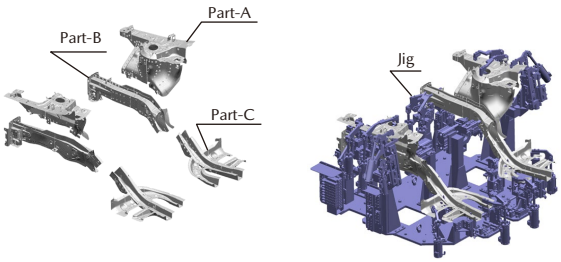


Fig. 12　Example of the Underbody Tack Process

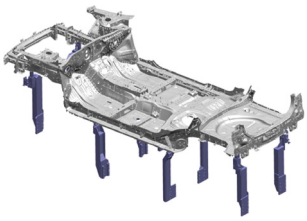


Fig. 13　Underbody Respot Process

3.3　等価品質実現における課題と取り組み

（1）事前評価・ボディー精度ねらい値の決定

まず，重量差のある 2 種類の車両構造で同じデザイン・外観品質を実現するためのボディー精度のねらい値算出を実施した。先述したように，マイルドハイブリッド車と BEV では PF の構造が異なる。そのため，構造からくる剛性差によりバッテリーなどの重量物搭載が精度変化につながることが懸念された。車両で精度差の出ないボディー剛性値を開発部門と協働で決定し，CAE 上でボディー状態の剛性差を抑える活動を実施した。指標にボディーの自重たわみを置き，目標値を差異 0.1mm 未満として構造開発を進めた。PF の前後 4 点を拘束し，自重を与えたときの PF 中央部変位量を Fig. 14 に示す。この結果から分かるように，差異が 0.1mm 未満とボディー剛性差を抑えることができた。バッテリーなど重量物搭載による精度変化を無視できるボディー剛性・構造を造り込むことができたため，それぞれの仕様で同じ精度目標を設定し，目標が達成できる沿い面精度や打点順序などの良品条件設定を行った。

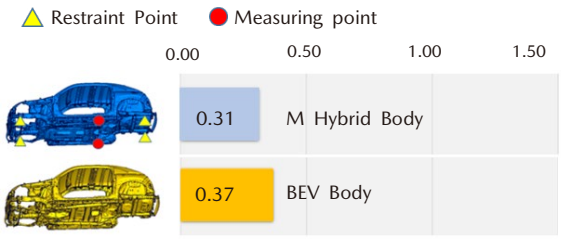


Fig. 14　Self-Weight Analysis

（2）事前評価・車体工程良品条件設定

マイルドハイブリッド車の PF は現行量産車と共通部分

が多い。そのため，共通部分の精度を活かし新規部分の精度ねらい値・工程要件を決めることから着手した。以降，新規部品の精度ねらい値や工程要件の決め方をフロントフロアのサイドシル部を事例として説明する。Fig. 15 に示すサイドシルインナーが新規部分で，それ以外が共通部分である。新規部品の沿い面ねらい値や打点順序を設定するために，共通部品の形状データを CAE に入力した。また，部品位置決め・拘束条件については事前構想に基づいた設定とした。変数は，Fig. 15 ◎ a, b 図示のスポット溶接順序と新設部品であるサイドシルインナーの精度とし，CAE での寸法精度評価を行った結果を Fig. 16 に示す。Fig. 16 に示した偏差のカラーマップからも分かるように，下の b 打点を先に加工した方が 0.5mm ほどサイドシル上部のフランジ面精度が良い結果となった。メカニズムとして，微小な沿い面精度差と断面形状の重心位置によって差が生まれることを突き止め，同構造部全てへ対策を展開した。次に新設部品であるサイドシルインナーの精度ねらい値を決めた。このように，精度品質の注力部位を検証し，マイルドハイブリッド車の PF 良品条件（溶接順序・部品精度等）を設定した。BEV の PF も同様に，これまで設定したマイルドハイブリッド車の PF 良品条件（主に部品精度ねらい値）を Input として，部品精度ねらい値・打点順序・加工時の保持位置などの良品条件を決めた。

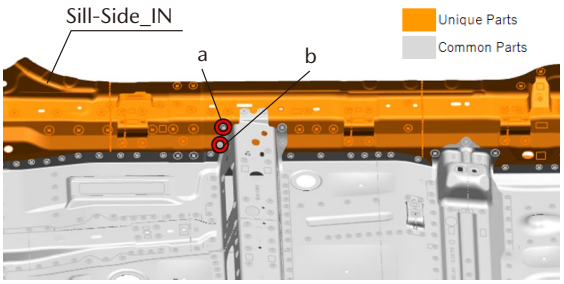


Fig. 15　Parts Condition and Spot Welding Point

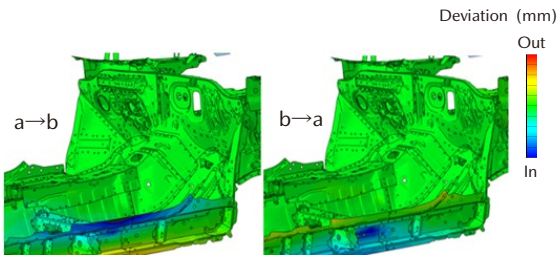


Fig. 16　Verification Result of Welding Sequence

（3）実機検証

事前評価で決めた各良品条件を，試作段階以降の現物で検証するプロセスをつくり，項目ごとに実機検証を繰り返した（Fig. 17）。工程ごとに，良品条件が再現されていることを確認し，加工後の精度測定を実施した結果，UT 工程ではマイルドハイブリッド車・BEV の PF ともねらいの精度を達成できていることが確認できた。しかしながら，UR 工程において BEV の PF のみ溶接加工による精度変化が生じた。変化が生じた部位は PF 前方に位置するフロントボディーと呼ばれる構成単位で，車両上方へ変位する挙動を示した。フロントボディーは外観品質に大きく寄与する部位のため重点管理していたのだが，車体組立の途中工程における PF の構造差による精度影響が当初の想定より大きかった。そのため，BEV の PF 構造における良品条件の見直しに向け，UR 工程における精度変化の要因追求に取り組んだ。

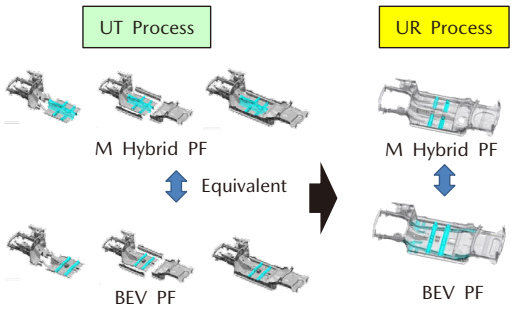


Fig. 17　Verification Process

（4）精度変化要因調査

精度を決める要具（治具）・部品・加工の因子を切り分けて精度変化検証計画をつくり実施した。要具については事前に可搬式 3 次元測定器を用い，ねらいの精度となっていることは確認済みのため，沿い面精度・加工について重点的に調査を行った。精度変化が最も大きいフロントボディー前方を定点測定箇所とし，スポット溶接 1 打点ごとに計測を行った。UR 工程は 4 工程あるが，そのうちの 1 工程の計測結果を Fig. 18 に示す。Fig. 18 から分かるように，スポット溶接の 11 打点目より精度変化が発生している。

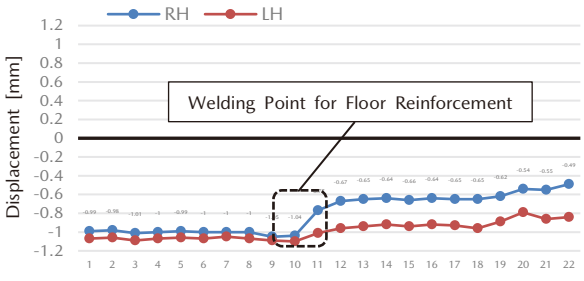


Fig. 18　Displacement Amount per Welding Point

11 打点目は Fig. 19 に示すフロアレインフォースメントと呼ばれる部品とボディーの骨格となるフレームとを溶接している打点である。残りの 3 工程においても，フロアレインフォースメントに関係する打点で精度変化が確認できた。

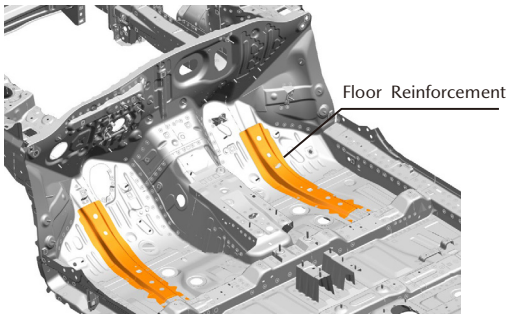


Fig. 19　Layout of Floor Reinforcement

このように，工程内での測定により精度へ影響を与える部位はつかめたが，この精度変化が溶接熱によるものか，沿い面精度によるものかを切り分けるために，スクリュー（ボルトアップ）検証を実施した。スクリューはスポット溶接部を溶接の代わりにボルトアップをしていくことで，熱の要素を排除した検証を行うことができる。この検証においてもスポット溶接検証と同様に，1 打点ごとの精度変化を計測した。その結果，スクリュー検証では精度変化は 0.2mm 以下でほぼ変化しないことがわかった。続けて，沿い面隙の影響を検証した。沿い面隙を鉄板で詰めた状態でスクリュー検証とスポット打点検証を行い，精度変化を計測した。隙詰めスクリュー・スポット溶接検証では 0.1mm 以下の変化とわずかに減少したものの，大きな効果は得られなかった。以上の検証結果より，溶接熱収縮が構造剛性に勝っていることが要因であることをつかんだが，制御因子ではないため直接対策はできない。そこで，制御因子である，沿い面精度・打点順序・部品拘束条件を振って対応策を検証した。

（5）施策

沿い面精度と打点順序を合わせて CAE を活用し検証した。Fig. 18 で 11 打点目より変化していることに着目し，寄与度が高いと思われる沿い面，打点をグループ分けし，実験計画法を用いて解析した。CAE で相対的に比較して，精度変化が最小になる条件を抽出，実機で確認した。何度か PDCA を廻し，最適沿い面精度を導き，ねらいを決め，部品修正を行った。同様に打点順番も最も変化が少ない打点順番を導き工程へ反映させた。更に，量産期間中に安定した品質の車両精度を維持し続けるには工程でコントロールして，外乱を受けにくくする必要がある。そのため，UR 工程での精度変化を予測した UT 工程での部品位置決め・拘束条件，UR 工程での形状規制により，電気の PF においてもねらいの寸法精度を実現し，同等の外観品質を実現した。

（6）車両まで含めた外観品質の造り込み

ボディーサイドパネルでデザイン面品質を保証し，ボディーでねらいの等価精度と外観折り合い精度を達成した後は，車両完成までの外観品質確認に取り組んだ（Fig. 20）。塗装乾燥炉での熱影響分析ではドアー等蓋物の外観折り合いを検証し，ねらいの折り合い精度を達成できるように造り込んだ。車両組立では，エンジンとモーター，ガソリンタンクとバッテリーの搭載場所と重量差による精度差が出ないように，関係部署が一致団結して早期段階から検証活動を行い，MX-30 の外観品質を造り上げた。

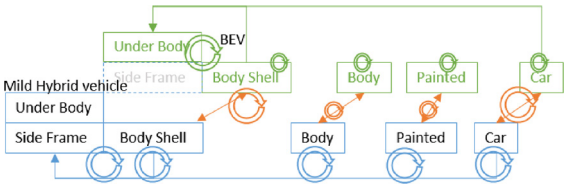


Fig. 20　Quality Control Process in 2-Power Sources Vehicle

4. おわりに

マツダが 2050 年にカーボンニュートラル化を実現する上で，マルチパワーソースに対応したクルマ造りを加速していく必要がある。その中でも，マツダの独自性を訴求できるデザインを全ての仕様で再現し，お客様に感動をお届けし続けることを目指した活動を行っている。

MX-30 では全ての仕様で同じデザイン・寸法精度を再現するために多くの苦労と期間を要した。今後のマルチパワーソース化拡大に向けて，溶接による精度変化予測と構造・工程への事前対策織り込みを行うための技術開発・プロセス構築を関連部門一丸となって進めていく。今回の取り組みから見えてきた知見を技術へ転換することより，マツダの強みである「魂動デザイン」の進化へとつなげていき，お客様に更なる感動をお届けできるよう挑戦を続けていく。

参考文献

（1）マツダサステナビリティレポート 2020

■著　者■

石井 哲雄

梶原 彰人

吉崎 真吾

江口 覚

中塚 勇輝

山田 孝行

特集：MAZDA MX-30

14

MX-30 省エネルギー 3 トーン塗装の開発

Development of Energy-Saving 3-Tone Paint Process for MX-30

永田　浩太郎 *1　服部　博晃 *2　松元　貴大 *3
Kotaro Nagata　Hiroaki Hattori　Takahiro Matsumoto

要　約

マツダは 2030 年を見据えた技術開発の長期ビジョン「サステイナブル “Zoom-Zoom” 宣言 2030」に基づいて Well-to-Wheel 視点での CO_2 排出量削減に取り組んでおり，生産工程においても再生可能エネルギーの利用や工程革新によるエネルギー・資源・廃棄物の削減を進めている。

今回，MX-30 にマツダ初となる 3 トーンカラーを採用した。一般的なマルチトーン塗装は塗装工程を数回周回させることで異なる色を塗り分けていくが，ボディーを塗装工程に通した回数だけエネルギーを消費するため環境負荷は大きくなる。本稿では，MX-30 に新たに採用した環境にやさしいマツダ独自の 3 トーン塗装の内容について紹介する。

Abstract

Mazda is taking a “Well-to-Wheel” approach to reduce CO_2 emissions based on its “Sustainable Zoom-Zoom 2030” long-term vision for technology development. We are also working towards using renewable energy in the production process and reducing waste and the use of energy and resources through process innovation.

The Mazda MX-30 is the first model to offer 3-tone color options at Mazda. In general multi-tone color options, paints are applied multiple times by repeating the painting process for every different color, resulting in a great environmental impact because of the energy required for every painting process. This article introduces the development of Mazda’s unique eco-friendly 3-tone paint process that has been applied to the Mazda MX-30.

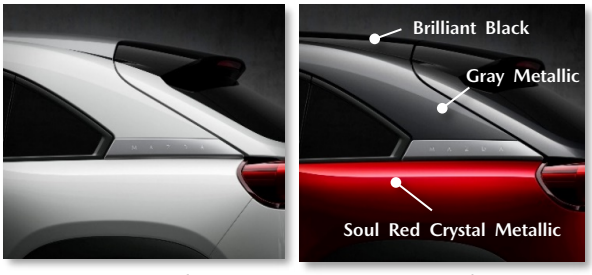
Key words : Environment, Energy, Resources, Production, Life cycle assessment, Body, Exterior, Paint, 3-tone

1. はじめに

マツダは「カラーも造形の一部」という考え方に基づき，魂動デザインの造形を光の陰影によって際立たせる特別なカラーであるソウルレッドクリスタルメタリックやマシングレープレミアムメタリックをお客様にお届けしてきた[(1)]。

MX-30 では「Human Modern」のデザインコンセプトの下，躍動的な生命感あふれる造形，そして特徴的なフリースタイルドアをより際立たせるために新たにフレームドトップ（3 トーン塗装）を採用した（Fig. 1）。

また，マツダはサステイナブル “Zoom-Zoom” 宣言 2030 に基づいて，ライフサイクル視点での環境負荷低減に取り組んでおり，環境にやさしい製品だけではなく生産段階での環境対策も進めている[(2)]。塗装工程は自動車生産工程の中でも特に環境負荷の高い工程であるが，その中でも製品に色彩を付与する上塗工程の CO_2 排出量は最も多い。



1-tone color　　3-tone color

Fig. 1　MX-30 3-Tone Color

*1〜3　車両技術部
Painting, Trim & Final Assembly Engineering Dept.

マツダでは「スリー・ウェット・オン塗装」や「アクアテック塗装」などの革新的な塗装技術により，世界最高水準の低環境負荷を実現してきた[(3)]。今後カーボンニュートラルの実現に向けて取り組みを進める中で，3トーン塗装による環境負荷の抑制を重要課題として位置づけ，環境にやさしい3トーン塗装を新たに開発した。

2. 工程設計の考え方

上塗工程の機能は，ボディーに美観や耐久性を持った塗膜を付与することである。具体的には，温度と湿度を一定に保った塗装ブースの中で塗料をボディーに塗装する。そして，高温に保った乾燥炉の中にボディーを入れて，塗料を化学反応で硬化させ，強固な塗膜をつくっている。

MX−30の3トーン塗装は，ボディーの下側半分をソウルレッドクリスタルメタリックなどのメイン色とし，ピラーとルーフサイドをシルバー色，ルーフを黒色とした合計3色の塗り分けを行う。

特に，2色目のシルバー色，3色目の黒色はボディーの上部半分に集中していることが特徴である（Fig. 2）。

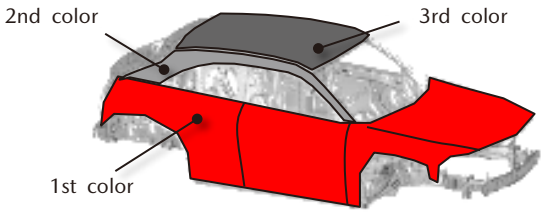


Fig. 2　Paint Area

Fig. 3に「一般的な3トーン塗装工程（a）」と「MX-30に採用した3トーン塗装工程（b）」との比較を示す。

ボディー塗装用の上塗工程は，ボディー外板やドア開口部やエンジンルームなどボディー全体を塗装する長い工程となっている。（a）の工程でMX-30の3トーンを塗装しようとすると，まずはボディー色の塗装，2色目のシルバー色，3色目の黒色と合計3回も上塗工程を周回させることになる。また，シルバー色と黒色に関しては，塗装する面積が小さいためボディー全体を塗装できる上塗工程は過剰能力であり，そこで消費されるエネルギーはロスである。これは，乾燥炉でも同じことが言える。

そこで今回，マルチトーン塗装に特化した専用工程を新たに設置し，そこで2色目と3色目の塗装をするようにした（Fig. 3(b)）。加えて，今回は単なる専用工程をつくるのではなく，「必要な部位だけに必要な量だけ」という工程設計コンセプトの下，一般的な方法の（a）と比較して大幅にCO_2排出量を削減できる新しい上塗工程の確立を目指した。この実現にあたっては，塗装工程及び乾燥工程における消費エネルギーの最小化が課題であり，以下の取り組みを行った。

1．材料の硬化温度を下げる
2．塗着効率の向上
3．塗装ブースのシンプル化，コンパクト化
4．乾燥効率の向上

次章に具体的な課題への取り組みを述べる。

3. 主要取り組み

3.1　低温硬化塗料

一般的な自動車用塗料はおよそ140℃以上という高温での乾燥工程を経て，美観や耐久性能を発現する設計になっているが，塗料の硬化反応選択の段階で硬化に必要なエネルギーが決まる。

そこで，エネルギーを大幅に削減するために低温で硬化する塗料の開発が最重要課題と考え，今回新たに開発に取り組んだ。

具体的には，アクアテック塗装にて開発した2液硬化型クリアにおける塗料設計の考え方[(3)]を，今回の3トーン塗装ではベース層にも適用し，80℃で硬化する塗料を開発した。

新たな塗料を用いる上で，美観や耐久性を持ったねらいの塗膜をボディー表面に正確に付与するために，塗装した塗膜のシンナー揮発の時間変化などをシミュレー

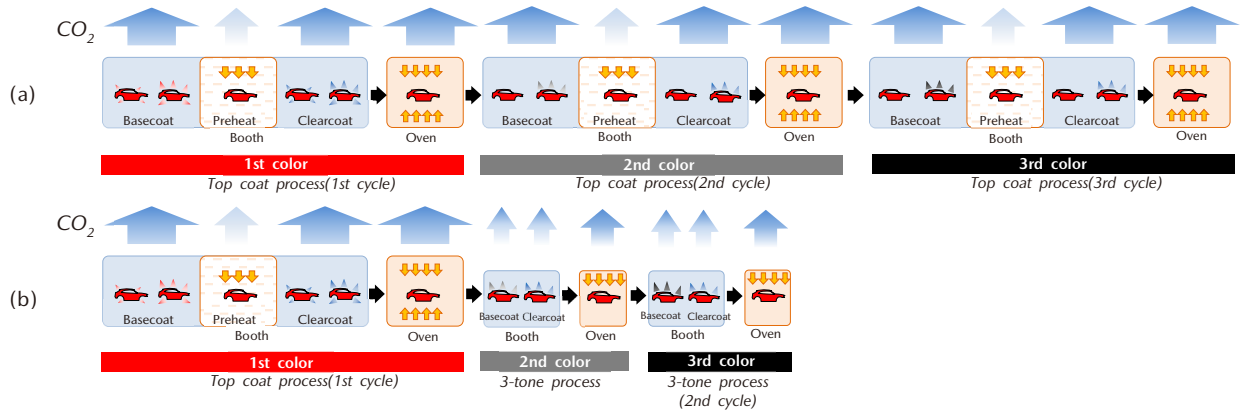


Fig. 3　CO_2 Emissions In 3-Tone Process

ション（Fig. 4）によって検証した上で，塗装条件の決定や塗装ロボットのプログラミングを行った。これによって，塗膜として保証すべき品質を確保しながら硬化エネルギーを削減できた。

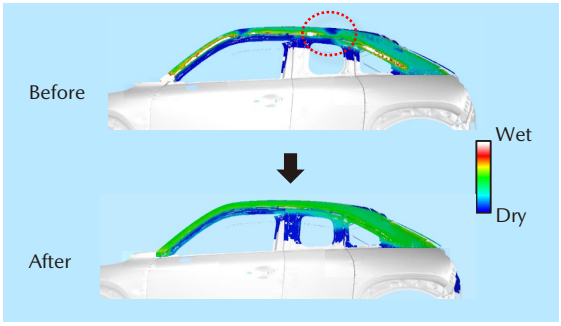


Fig. 4　Solvent Evaporate Simulation

3.2　省エネ塗装機

一般的な塗装システムでは，エアー式スプレーガンや回転式静電ベル塗装機などにより塗料を粒子化して空中を輸送し，塗装面に塗着させる方式が用いられている。通常，自動車ボディーのような大きな面積のワークを限られた一定時間内で塗装する必要があり，更に塗装機とボディーとの相対的な位置関係のバラツキの影響を吸収するために，スプレーパターンの大きい塗装機を使用しているが，MX-30 の 3 トーンのような狭い面積の塗装範囲に対しては，非塗装面にはみ出して付着したり（Fig. 5 (a)），空中輸送中に塗装面から大きく外れて非塗装面や付帯設備に付着したりするといういわゆるオーバースプレー（以下，O/S）が発生してしまい，材料ロスとなる（Fig. 5 (b)）。

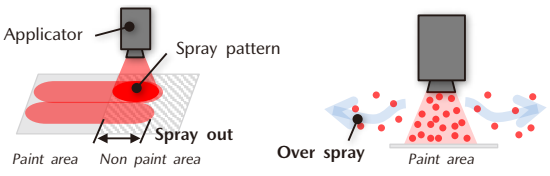


Fig. 5　Material Loss

従って，①細かい部分の塗装に適したスプレーパターンの小さい塗装機の実用化と②O/S の最少化を課題ととらえ，以下に取り組んだ。

まず，①に対して，エアー使用量を最少化できる新たな塗装機の量産適用に挑戦し，先述のシミュレーションを活用しながら塗装面からはみ出す面積を最小化した。また，②に対して，スプレー塗装する際のエアー使用量をいかに少なく抑えるかがポイントとなった。今回採用した塗装機は塗料を粒子化し，塗装面へ付着させるために，エアーを使用しているが，その使用量が多くなると，塗装面に当たり跳ね返ったエアーやブース内の気流などによりエアーの流れに乱れが発生し，それにより O/S が増加する。今回，塗装機とボディーとの相対位置のバラツキを設備によって小さくする事で，小さなスプレーパターンを適用することができた。これによりエアーの使用量を最少化し，従来よりも O/S の少ない塗り方を実現できた（Fig. 6）。

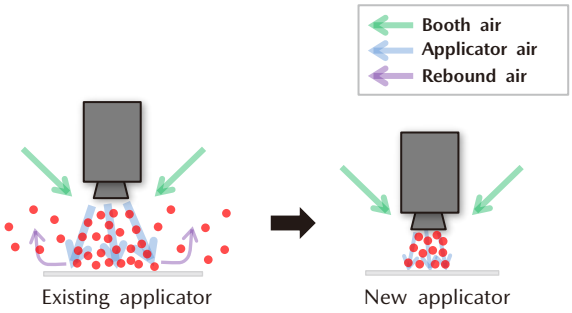


Fig. 6　Over Spray By Turbulence Flow

また，通常の塗装ラインでは 1 つの塗装機に対し，異なる塗色の塗料供給装置を設け，複数の塗色を塗装する。この際，1 つの色を使い終えるごとに溶剤で経路内を洗浄した後で，異なる塗料を充填する色替えを実施する。この際，経路内から押し出して捨てる塗料やそのために使用する溶剤も大きな材料ロスである（Fig. 7 (a)）。

そこで，塗装機に付随する塗料ホースやエアホースなどをコンパクトに配置し，塗色ごとに塗装機を設けることによって，色替えを廃止し，材料ロスを大幅に削減できた（Fig. 7 (b)）。

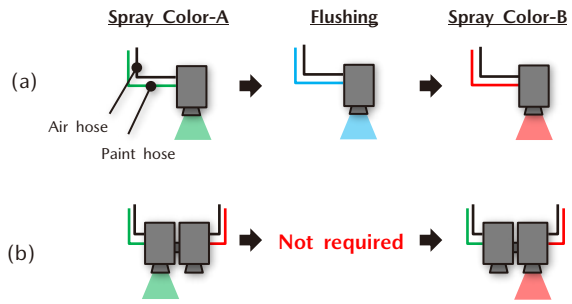


Fig. 7　Color Change Process

このように，ロスとなっている塗料や溶剤は廃棄または回収して一部再利用されるが，塗料や溶剤の製造には多くのエネルギーが必要であり，ライフサイクルアセスメントの観点においてもエネルギーを削減できた。

3.3　省エネ塗装ブース

塗装ブースの機能は，大きく 3 つあり，1 つ目は，労働安全衛生法に基づく省令である有機溶剤中毒予防規則に則り，安全な作業環境を確保するため，塗装ブース内の換気することである。2 つ目は，塗膜の中に含まれる溶

剤分の揮発速度を一定に保つため，塗装ブース内の空気温度を一定に制御することである。3 つ目は，排気に含まれる有機溶剤分を外部に排出せずに回収することである。

一般的な塗装ブースでは，上記 1 つ目と 2 つ目を満足するために，天井から温度制御した空気を供給して，塗装できる環境を作るとともに，床から排気することで，一定速の下降気流を作り出し，塗装ブース全体の換気を行っている。また，ボディー全体の塗装を前提として設計されており，3 トーン塗装のように特定部位のみを塗装する場合には，多くのエネルギーがロスとなる上に，塗分け回数に応じて，複数回塗装ブースを通過させなければならないことから，それに応じてロスが増大する。

更に，3 つ目を満足するために，ブース下部を循環させている水流に排気を接触させることで，排気中に含まれている有機溶剤分を回収する方法が用いられている。このように水流循環させる湿式回収方式では，水流を作り出すために複数の大揚程ポンプを回さなければならず，多くのエネルギーが必要になる。また，循環水に含まれる有害物質を無害化する排水処理にも多くのエネルギーが必要である（Fig. 8(a)）。

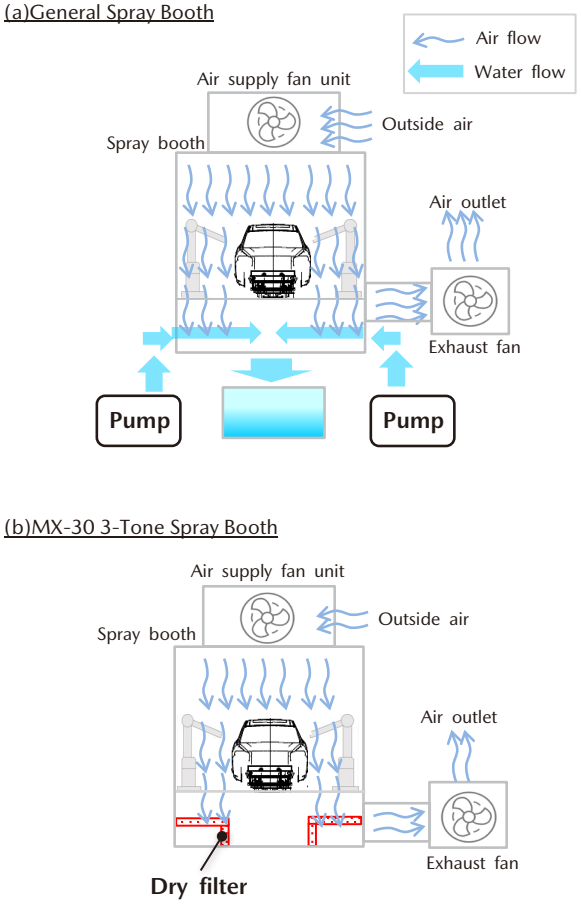


Fig. 8　Spray Booth（Front View）

従って，①塗装ブースにおける必要空気量の削減と②O/S 削減を課題ととらえて以下の取り組みを行った。

①に対する施策として，ボディーを各工程に一時停止させるシャトル搬送形式を採用し，ベース塗装・クリア塗装・セッチングといった各工程に必要な作業時間をそれぞれ一か所で確保するライン設計を行った。これにより塗装ブース長を短縮することで，必要空気量を大幅に低減した。

加えて，工程間にシャッターを導入し，シャトル搬送と同期動作させて，ボディー搬送時のみ開閉動作する方式を採用した。これにより，ブース内空調と外気との接触時間を最小限に抑え，ブース内温度の変化を抑制することで，空気の温度を安定に維持するための加温や冷却にかかるエネルギーを削減した。

更に，シャッターによる間仕切りを活かし，ゾーンごとに給気風量の個別コントロールを適用した。一般的に自動車製造ラインにおける塗装ブースには大きく分けて 4 ゾーンあり，塗装前のボディーのワイピングなどの作業を行う『準備』，実際にボディーに塗膜を付与する『塗装』，塗装後に塗膜中の溶剤を揮発させながら塗膜を安定化させる『セッチング』，乾燥炉からの熱気を遮断する『エアシール』の構成になっている。しかしながら各ゾーンの必要風量は，機能上同一ではなく，全てのゾーンを同じ風量で運転することは大きなロスとなる。今回は各ゾーンに間仕切りを設けることで各工程に機能上必要な風量のみを供給し，全体として作動空気量を削減した（Fig. 9）。

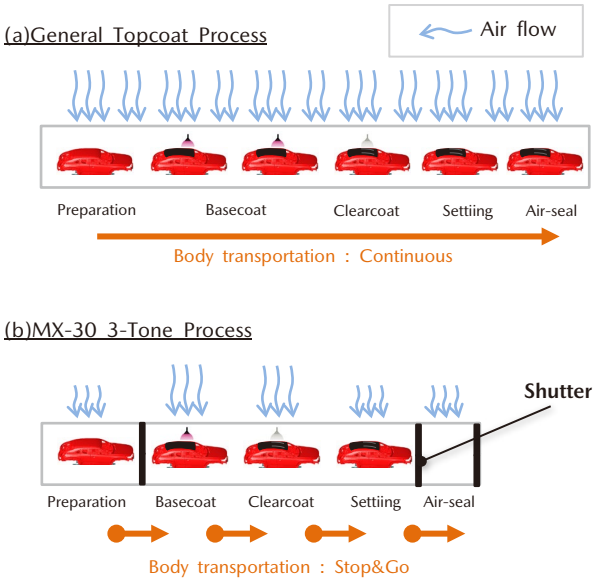


Fig. 9　Air Supply In 3-Tone Process(Side View)

また，②に対する施策として，O/S の回収を乾式フィルターで捕捉する方式とした。今回の 3 トーン塗装工程では，3.2 のように O/S を削減できたため，乾式フィルターで十分に有機溶剤分を捕集でき，湿式溶剤回収システムの運転にかかっていたエネルギーを全て削減することができた（Fig. 8(b)）。

3.4　省エネ乾燥工程

塗装における乾燥工程の機能は，塗膜に熱エネルギーを与え，硬化させることである。

一般的な乾燥工程は，ボディーの外側だけでなく，ドア内板部などのお客様の目に触れるさまざまな部位に塗装された塗料を硬化させるため，高温の乾燥炉内にボディーを投入し，ボディー全体を加温する方式である（Fig. 10（a））。

しかし，今回の 3 トーン工程では，ボディー上部のみを塗装しており，全体を加温する必要はない。

従って，①狙った部分（塗膜）だけに熱を供給する設備構造と，②必要な時間のみ熱を供給する設備制御を課題ととらえ，以下の取り組みを行った。

①に対する施策として，アクアテック塗装のフラッシュオフ工程で用いた赤外線ヒーターにより放射熱で塗膜のみを温める技術を進化させ，ボディー上部の塗膜のみ加温する乾燥炉構造に改良した。具体的には，ボディー側面のピラー部を温めるヒーターを炉内側面に配置し，ルーフを温めるヒーターを炉内天井に配置して，塗装したエリアのみのヒーターを作動できる制御にした（Fig. 10(b)）。

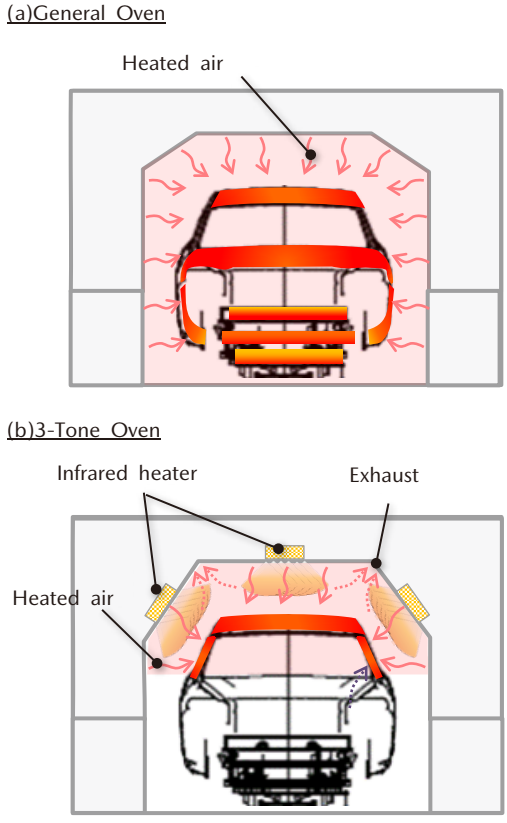


Fig. 10　Oven（Front View）

しかし，アクアテック塗装におけるフラッシュオフは塗膜中の水分を蒸発させるのみの機能だったが，赤外線ヒーターのみで塗膜を硬化させるには，ボディー鋼板に多くの熱を奪われ，効率よく塗膜を温めることができない。そこで，ボディー上部のみの雰囲気を温める温風も併用することで，短時間かつ省スペースでの塗膜硬化を達成した。具体的には炉内側面に温風の吹き出し口を設け，炉内天井部から排気して循環させることで硬化させたい塗膜の付近のみの上部雰囲気を温めるようにした。また，これに対するノイズを低減するため，塗装ブース同様に，乾燥炉出入り口にはシャッターを設け，外気遮断を施している。また，ブースと同様にシャトル搬送を用いて，必要な作業時間をそれぞれ確保して塗膜硬化させるライン設計によりロスを最小化した。

次に，②に対する施策として，工程内での塗膜に熱を与える効率を最大化するため，赤外線ヒーターの部位ごとによる出力・時間を可変制御できるようにした。塗膜は急激に温度上昇させると品質不良を招き，緩やか過ぎると生産性が低下する。そこで，塗色ごとの塗料の熱伝達率や熱伝導率に併せて最適な昇温ができるように出力部位・出力値・出力時間を制御することで，昇温と温度キープのためのエネルギーを最小化した。

以上のように，必要なところに必要なエネルギーを与える乾燥工程を実現し，3 トーン乾燥炉でのボディーの温度分布を確認すると，温めるべき所のみが温まっている様子が観察できる（Fig. 11）。

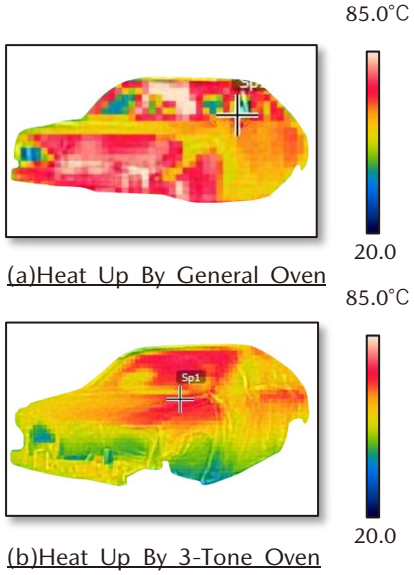


Fig. 11　Temperature Distribution By Thermography

また，乾燥炉を出た後の検査工程で人が作業できるように安全性と作業性を確保できる温度まで，ボディーを冷却する工程が必要である。この冷却工程においても，乾燥工程と同様に，ピラーとルーフのみ局所的に冷却する考え方で設備設計し，冷却風量を少なくし，間欠運転することで冷却時間を最小化することで，工程全体の消費エネルギーを最小化できた。

4. 省エネルギー 3 トーン塗装の効果

今回の一連の取り組みにより，一般的な 3 トーン塗装工程に比べて大幅なエネルギー削減が可能となり，年間 CO_2 排出量に換算すると，約 37%削減できた（Fig. 12）。

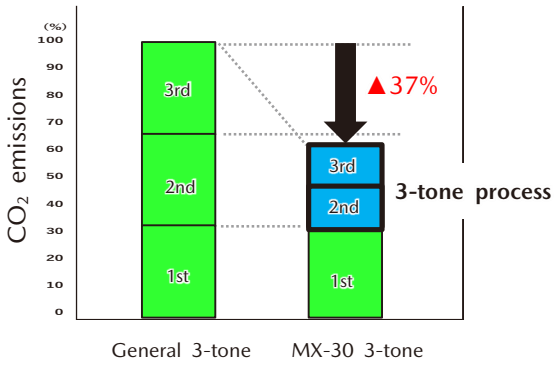


Fig. 12　CO_2 Emissions

この他にも，検査作業に必要な照度を人間工学に基づいて明らかにし，それを実現できる LED 照明システムを導入して検査工程における消費エネルギーも従来比 80%削減している。

また，湿式ブースを廃止したことにより水資源の保全にも貢献できた。

更に，今回の 3 トーン工程は環境にやさしいだけでなく，大規模な設備投資なしで，マツダ創立 100 周年記念の限定車に採用したような 2 トーンカラーも導入する事ができ，将来の商品ラインナップの幅を広げることを可能にするフレキシブル性も兼ね備えている（Fig. 13）。

Fig. 13　MX-30 100th Anniversary Special Edition

5. おわりに

先述のように，塗装工程は環境負荷の高い工程であり，持続可能な社会実現のためには，省エネルギーの取り組みを加速させていく必要がある。今回開発した技術や知見を継続進化させ 3 トーン工程やアクアテック工程の更なる環境負荷低減に取り組みつつ，高意匠カラーなどのお客様へ感動して頂けるような価値を提供することに，今後も挑戦していく。

参考文献

(1) 平野ほか：ソウルレッドクリスタルメタリックの開発，マツダ技報，No.34，pp.87-92（2017）
(2) 本橋ほか：サステイナブル “Zoom-Zoom” 宣言 2030，マツダ技報，No.35，pp.3-8（2018）
(3) 篠田ほか：VOC と CO2 を同時削減する新塗装技術「アクアテック塗装」，自動車技術，Vol.70，No.6，pp.77-82（2016）

■著　者■

永田 浩太郎

服部 博晃

松元 貴大

論文・解説

15

Self-empowerment Driving Vehicle の開発
Development of Self-empowerment Driving Vehicle

栃岡　孝宏 *1　田内　一志 *2　前堂　勝久 *3　山本　友也 *4　和泉　知示 *5
Takahiro Tochioka　Kazushi Tauchi　Katsuhisa Maedo　Tomoya Yamamoto　Tomoji Izumi
石崎　大智 *6　富井　圭一 *7　任田　功 *8　岩瀬　貴志 *9
Daichi Ishizaki　Keiichi Tomii　Isao Toda　Takashi Iwase

要　約

マツダのコーポレートビジョンは「多くの人々にカーライフを通じて人生の輝きを提供します」とうたっている。これは障がいをもたれた方々も例外ではなく，クルマを愛する全ての人々のために，どんな困難にも独創的な発想で挑戦し続け，「走る歓び」により生き生きとした豊かな人生を提供するための宣言である。Self-empowerment Driving Vehicle は，上記に基づき，障がいをもたれた方々もご自身の運転操作で安心安全に移動することを通じて，日常生活で人生の主役となれるよう，また自己選択を行い生活や環境をコントロールできるよう，自分らしくありたいと願う「あなた」を尊重・大切にして支援することを目指している。本稿では，限定免許をお持ちの方の中で多くを占める，両手は使えるが下肢に障がいをもたれた方々への支援に焦点を当てた技術開発について紹介する。

Abstract

Mazda's Corporate Vision states that we brighten people's lives through car ownership. This statement means that we aim to brighten lives of all car lovers including people with disabilities and will continue to tackle challenges with creative ideas and offer cars that provide driving pleasure and help people lead fulfilling lives. Based on the above, we developed a Self-empowerment Driving Vehicle that provides people with disabilities with safe/trusted travel by their own driving operation. Through this vehicle, we are committed to respect/care for and support people with disabilities who would like to live life in their own way so that they can play a main role in their daily lives and control their lives and environment by self-selection. In this paper, we will introduce the technological development which focuses on the lower limb handicapped people who can do driving operation by using both hands, which accounts for the majority of holders of driver's license.

Key words : Self-empowerment Driving Vehicle, Self-Operated Vehicle, Access Board, Autonomous Valet Parking, Wheelchair

1. はじめに

約 60 年前，マツダは手動運転装置を開発，R360 クーペに搭載し販売していた。3 代目社長松田恒次は足が不自由であったこともあり，全ての人にクルマを運転する当たり前の幸せを提供するために，手動運転装置を開発したという記録が残っている。Self-empowerment Driving Vehicle は，松田恒次社長の思いを継承し，約 60 年の時を経て最新の技術で蘇らせたものである（Fig. 1）。

開発を始める前に，多くの下肢障がい者の方へ困りごとのヒアリングを実施した。そして，多くのお客様に共通する困りごとの解決と，マツダがお届けしたい価値「走る歓び」を実現するために，「運転」「クルマへの乗り込み」「車いすの積み込み」のシーンに焦点を当てて開発を

*1〜2　技術企画部
Technology Planning Dept.
*3　E&T 車両性能開発部
Vehicle Performance & Research Development Dept.
*4　E&T ボデー・シャシー設計部
Body & Chassis Engineering Dept.
*5〜7　統合制御システム開発本部
Integrated Control System Development Div.
*8〜9　企画設計部
Architecture Design Dept.

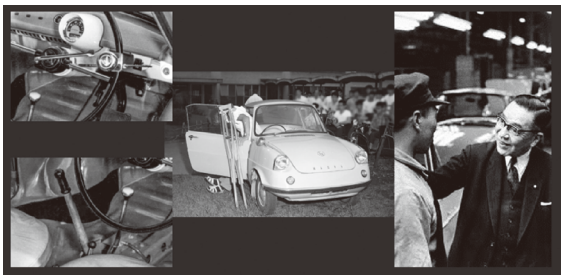


Fig. 1　R360 Coupe Manual Driving Device

進めた。各シーンに共通する開発思想は以下 3 点である。

・安全安心である。
・使いやすさを極めるために，人間中心で考える。
・低価格で提供する，個人の能力を発揮していただくために，過剰な支援は避ける。

なお，ベース車両は MX-30 を選択した。これは MX-30 のコンセプト「私らしく生きる」と Self-empowerment Driving Vehicle の目指す姿が合致すること，及び MX-30 の特徴であるフリースタイルドアの開口の広さを活用し，服を汚さずスマートで筋負担の少ない車いすの積み込み方式を新たに提案できる可能性があると考えたためである。（詳細は 2.3 で記載）

各シーンとそれを支援する装置の関係は以下である。次章で装置ごとに具体的に説明する（Table 1）。

Table 1　Scenes and Devices

Scene	Device
Driving	Ring type accelerator
	Push type brake・Elbow pad
Loading	Rear electric door
	Lightweight wheelchair
	Attachment
Boarding	Access board

2. 装置の紹介

2.1　リング式アクセル

市場には片手でハンドル操作をするさまざまな手動運転装置が存在するが，今回は両手での運転操作頻度を高めることができるリング式を採用した（Fig. 2）。両手で運転することは，ハンドル操作性や上半身の姿勢保持性の向上，サンバイザーの操作やドリンクを飲むことが運転中に可能になる等の利点があると考えている。

リング式アクセルは，ハンドルの内側にリングを設け，これを親指もしくは母指球で押し込むことで加速する構造である（Fig. 3）。通常，ハンドルを握る際に親指と母指球は大きく寄与しない。すなわち，押し込み方式を採用することでアクセル操作とハンドルをしっかり握ることの両立を可能とした（Fig. 4）。

Fig. 2　Ring Type Accelerator Device

Fig. 3　Pushing Operation Image

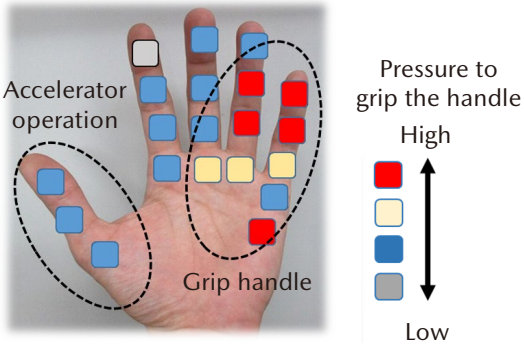


Fig. 4　Pressure Distribution Image

また，リングはハンドルと同心円となるようにレイアウト設計した。これにより，ハンドルを持ち替えて違う場所を握ってもハンドルから同じ位置感覚にリングがあるため直前の押し込み量を再現しやすくなることと，仮にリングがない場所を握ったとしてもハンドル形状を頼りにリングを直ぐに探せることに配慮している。なお，リング式アクセルは MX-30 本来のエアバック性能，メーターの視認性を阻害することのないようレイアウト設計されている。

また，リング式アクセルと通常のフットペダルアクセルは容易に切り替えが可能となっている。これにより，旅行などで遠出をするようなシーンでは家族や友人と容易に運転を代わりながら同じクルマで一緒にドライブを楽しむことができる（Fig. 5）。

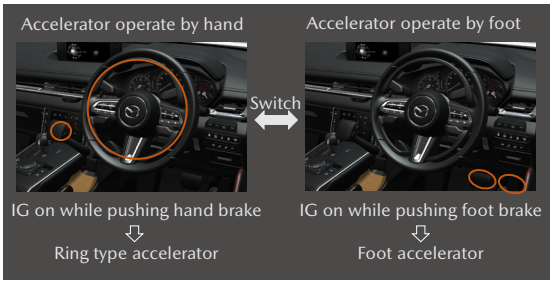


Fig. 5　Switching Image

基本構造については以上で，更に「意のままに操れて気持ちがいい，また運転したい，出かけたい」と思っていただけるよう「操作に慣れるためのコツがつかみやすく，滑らかに上手く運転しようとする誰もがもつ願望に対して応えることのできる操作システム開発」に注力した。その具体的事例を以下に示す。

（1）操作量に対する加速度の最適化

リング式アクセルの押し込み量は，押し込み時に使う腕の筋負担を考慮し，筋負担が極端に大きくなることのない最大 18mm に設定した。しかし，これは足の押し込み量約 50mm に対して小さいため，手の操作をそのまま車両に入力すると加速度が過敏になり，滑らかな操作が難しくなる。そこで，リング式アクセルと車両本体との間に中間制御ユニットを設け，押し込み量に対する加速度が穏やかになる方向に最適化した（Fig. 6）。

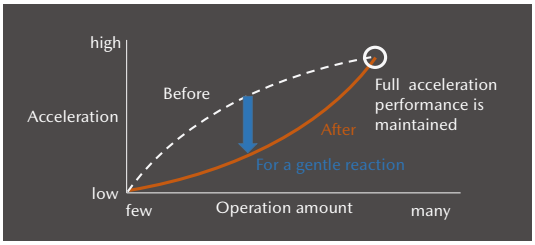


Fig. 6　Optimized Image

また，狭い駐車場のような，更に繊細な操作が必要となるシーンに対しては，より緩やかな加速度となる SLOW スイッチをハンドル横のインパネ上に設置し，シーンに合わせて素早く切り替えができるようにした。

（2）直感的アクセルコントロール

交差点の右左折・立体駐車場のスロープのような舵角が大きくなるシーンでは，ハンドルの持ち替えと，アクセルの押し直しが同時に発生する。このようなシーンでは一定速度を維持するための押し込み量が瞬時に分からないと滑らかな操作が難しい。そこで，押し込む際に最初の一定量は加速がゼロ（定速），更に押し込むと大きな加速，この間に操作の基準となる明確な段差（当たり）を感じられるように設計した。またこの当たりは，定速走行のしやすさ向上，発進する際の緩やかな加速度による安心感にも寄与する（Fig. 7）。

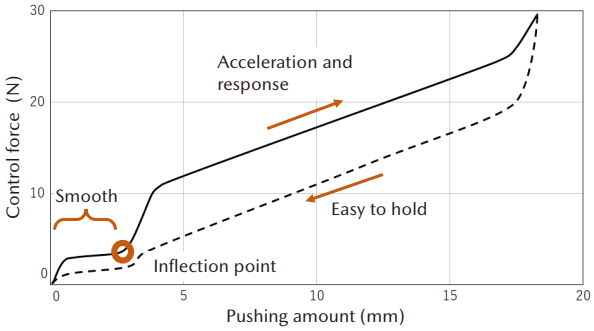


Fig. 7　Intuitive Accelerator Control Image

2.2　プッシュ式ブレーキ・肘当て

プッシュ式ブレーキは，緊急時において“瞬時”に“しっかりと”ブレーキをかける必要があるため，ブラインド操作ができるとともに，肩を支点に筋力が発揮しやすい位置と角度を採用した。また“細かな操作”を実現させるために肘当てを設置し支点を作り，肘から先での細かなブレーキ操作を実現した。支点を設ける考えはオルガン式アクセルペダルと同様で，支点を作ることによって微妙なペダルワークができる考え方を踏襲している。なお，プッシュ式ブレーキは，十分な足元スペースの確保と，シートの前後スライド量を阻害しないことを考慮しレイアウトされている（Fig. 8, 9）。

また，プッシュ式ブレーキにはハザードスイッチとシフトアップダウンスイッチを搭載し，ブレーキ操作と同時にこれらの操作が手元でできるようにしている。シフトアップダウンスイッチは車両が EV の場合，シフトダウンすることで回生を強め，ブレーキ操作の頻度を低減し，両手で運転する頻度を高めることも可能となっている（Fig. 9）。

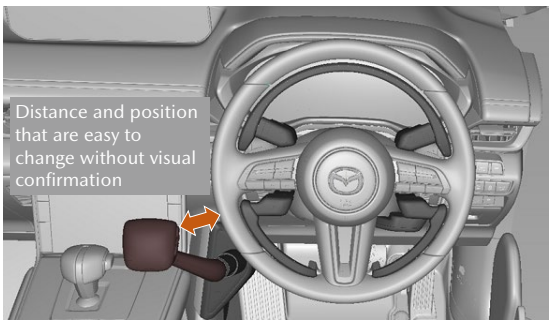


Fig. 8　Brake Device Layout

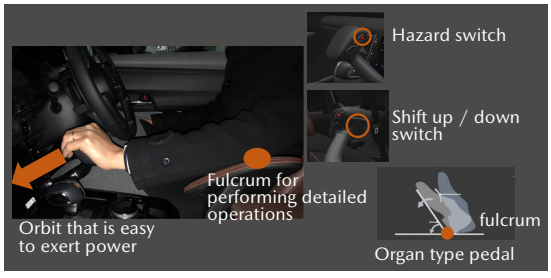


Fig. 9　Brake and Switch Device Layout

2.3　リア電動ドア

車いすの積み込みは，フリースタイルドア（B ピラーレス）の特徴を活かし，運転席のシートを倒しお腹の上を通す一般的な積み込み方式ではなく，運転席後ろの開口部を通すことで服を汚さずに積み込める新たな方式を提案している（Fig. 10）。

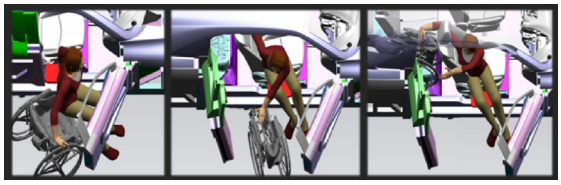


Fig. 10　Loading Image

この際，車内からリアドアの開閉をする必要があるが，小柄な方だと手が届かない可能性がある。これに対処するためにリアドアを電動化した。スイッチは車内からでも外からでも操作できるよう 2 箇所に設置した。また，挟まれる危険を回避するためにドアを閉じる操作と閉じ切る操作の 2 段階方式を採用した（Fig. 11）。

Fig. 11　Operation Switch Layout（2 places）

2.4　軽量車いす

2.3 節で前述した積み込み方式であっても，片手で車いすを持ち上げる点，ドア開口やシートを避けなければならない点は一般的な方式と同様であり，車いす利用者にとって身体的負担が十分に小さいとは言い難い。この負担の一番の要因は，車いすの重量にある。更に，積み込みに要する時間の長さも負担が増加する一因となっている。そこで，車両という限られたスペースに素早く積み込むため，軽量，かつコンパクトに畳める車いすを新たに開発し，積み込み時の負担を軽減することを目指した。

軽量化を実現するために，車体骨格構造の徹底したシンプル化と，CFRP への材料置換に取り組んだ。更に，シート部（座面と背もたれ）を着脱式とし，そのフレームを車体の剛性部材として機能させることで，1 ユニットの重量が 3.5kg 以下，すなわち女性が片手でも楽に持ち上げられる軽さを実現すると同時に，車体部をコンパクトに折り畳むことを可能とした（Fig. 12）。

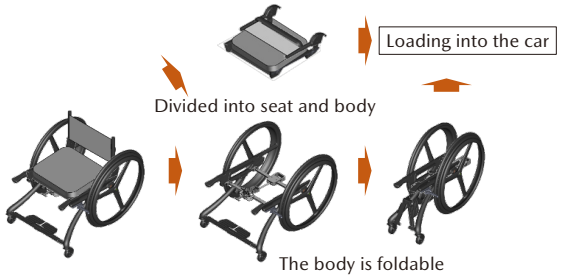


Fig. 12　Lightweight Wheelchair

2.5　アタッチメント

2.4 節で前述した車いすを，2.3 節で前述した積み込み方式で後席上に積み込むにあたり，以下の 3 つを目的としてアタッチメントを開発した。

・車いすを，楽に，素早く安全に積み込むためのサポート
・積み込み後の車いすによるリアシートの汚れ防止
・走行中の車いすのガタつき／飛び出しの抑制

アタッチメントの構成要素は 4 つであり，各機能は次のとおりである。①車いす車体部の車内への誘導と走行中の保持を担うフレーム，②車いすの前輪の保持と定位置への格納の目視確認ができるキャスタートレー，③リアシートの汚れを防止するシートカバー，④車いすシート部の後席足元へのスムーズな出し入れと走行中の保持を担うシートトレー（Fig. 13）。また，後席乗員数が増えた場合にアタッチメントを素早く取外せるよう，車両への固定は，着脱が容易な ISO FIX ラッチコネクターを活用している。

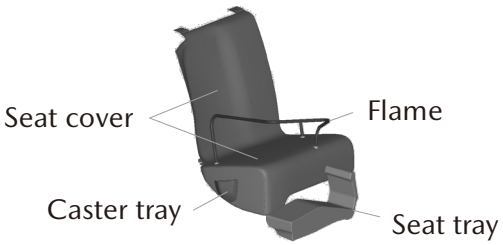


Fig. 13　Attachment

2.6　アクセスボード

車いすからクルマへの乗り込みを支援する装置は，ボード式，回転式，リフトアップ式等が市場に存在する

が，両腕をある程度動かすことのできるお客様を想定した場合，支援の程度が過剰でなく，乗り込みに要する時間が最短となるボード式を採用した（Fig. 14）。

	Board type	Roll seat type	Lift up seat type
Degree of support	Appropriate	Excess	Excess
Time	Short	Long	Long

Fig. 14　Device Comparison

アクセスボードを用いた乗り込み手順を示す。①片方の手をアクセスボードに突き，もう片方の手は車いすアームレストもしくはフレームに突いた状態でお尻を持ち上げる。②手を突いているアクセスボード上に移動しお尻を預ける。③上半身，お尻を車内に入れ，④車両シート上のお尻を中心に回転し足を車内に入れて乗り込み完了となる。この一連の動きを考慮し，アクセスボード形状に求められる要件は，お尻と手が同時にしっかりと付ける面積を確保しつつ，足入れ軌跡の邪魔にならないことと定義し，これらを満足する形状を採用した。高さについても，車いす・車両シートの地上高を踏まえ，安全かつ楽に乗り込めることに配慮し設計した（Fig. 15）。

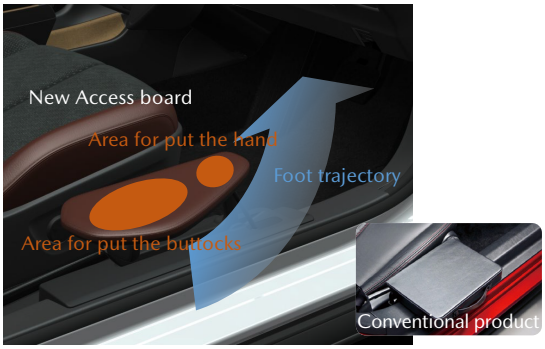


Fig. 15　Access Board

なお，ドアトリムとの干渉を防ぐために取り外し不要な折り畳み構造を採用している。また，折りたたむ際にはサイドエアバックの性能を阻害しないよう，前方向にワンプッシュで折りたためる構造を採用した（Fig. 16）。

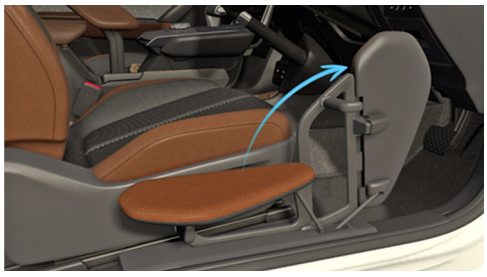


Fig. 16　Folding Structure

2.7　デザイン

本開発にあたり，上記装置を搭載したとしてもMX-30が本来もつ世界観を阻害することなく，インテリアデザインをお客様に楽しんでいただきたいと考えた。そこで全ての装置はMX-30のインテリアのこだわりである「空間の抜けを感じさせるパーツや，自然な風合いの素材にこだわり，開放感と安心感に包まれる空間」に調和した形状，材質，色調とした（Fig. 17）。

Fig. 17　Design Image

3. 将来に向けた乗降を支援する技術開発

最後に，クルマへの乗降を支援するための取り組みとして自動バレーパーキングシステムの開発を紹介する。車いす利用者にとって駐車や乗り降りのシーンにはさまざまな障害が存在しており，自由な移動の妨げになっていることが「1. はじめに」に記載したヒアリングで分かった。例えば駐車スペースが狭く乗り降りができない，専用駐車スペースにパイロンが置いてあり乗り降りを2度繰り返す必要がある，電気自動車の場合は急速充電口に近づくだけの十分なスペースが確保できない，広い駐車スペースを見つけることができたが目的地まで遠い等の事象が挙げられる。これらを少しでも解決するために自動バレーパーキングシステムの開発に取り組んだ。バレーパーキングとは一般的に駐車を係員にお任せできるサービスのことをいう。自動運転技術を活用することで，クルマが自動運転で広い場所に迎えに来る，もしくは広い場所で降りて指定の駐車場に停車してくれることを実現し，そもそも駐車する行為からお客様を解放することで上記障害を回避しようとしたのが自動バレーパーキングシステムである。自動バレーパーキングシステムは大きく4つの技術で構成されている。

(1) 危険を認知判断し回避する技術

超音波センサーを用いて周囲の障害物（距離・方位）を検出し，危険を察知すると自動で停車し衝突を回避する（Fig. 18）。

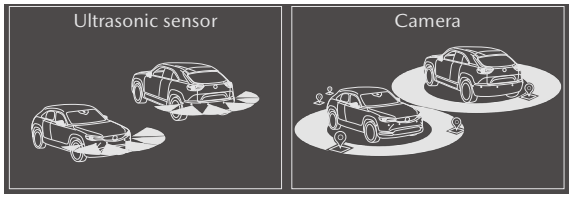


Fig. 18　Sensor Layout

（2）自車の位置を知る技術

準天頂衛星システム（QZSS※1）を用いたcmオーダーの測位システムにより，高度な駐車制御を実現した。また，ランドマークの位置情報を用いることで，衛星の電波が届かない屋内でも高精度な位置推定を可能としている。更に，ランドマークの位置情報が読み取れず，衛星の電波も届かない場合は車速，ヨーレート（回転角速度）を組み合わせて位置推定を行う（Fig. 19）。

※1QZSSは，準天頂衛星システムサービス(株)の登録商標です。

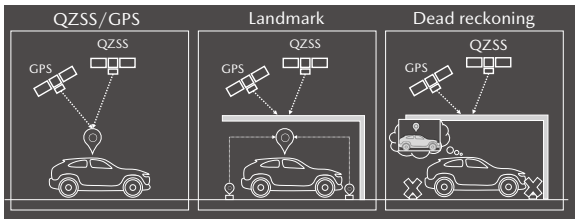


Fig. 19　Position Estimation Function

（3）自動で走る技術

管制センターの配信情報から誘導経路を生成し，経路に対して車両の特性を踏まえた挙動を予測し，滑らかに制御することで，人間の運転に近い安心感のある車両運動を実現した（Fig. 20）。

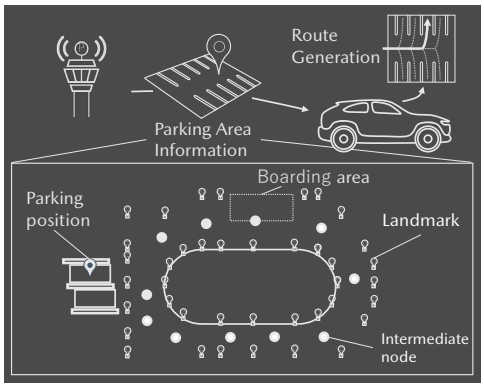


Fig. 20　Self-Driving Function

（4）ドライバーとつながる技術

広い場所での乗降前後に，迎えに来るもしくは駐車の指示が遠隔から可能なスマートフォンを用いた操作端末を開発した。端末のインターフェースは「誰でも使える」を目指して，「誰でも押せる」ボタン寸法，「誰でも読める」フォントサイズ，「誰でもわかる」インタラクションの設計を行った（Fig. 21, 22）。

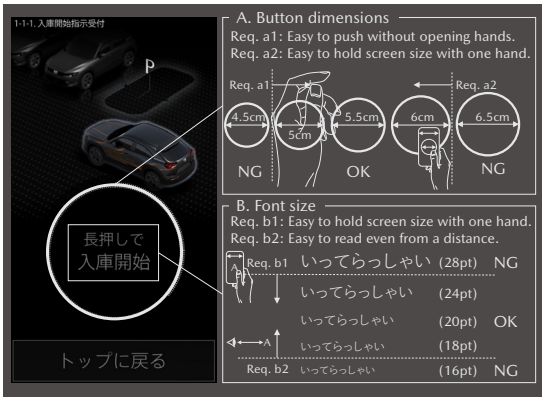


Fig. 21　Button Design

Fig. 22　Message Design

上記自動バレーパーキングシステムのような乗降及び駐車を支援する機能は，今回の技術開発で得た知見を活かし，まずは駐車枠周辺での支援から市販化を目指したい。その後，歩行者等が侵入しないクローズドな駐車スペース，専用の乗降スペース，各車の走行を管理する管制センター等のインフラ整備状況，さまざまな駐車場で安全に走行できる車両側の技術開発が整い次第，駐車場全体での支援機能として自動バレーパーキングシステムを提供したいと考えている。

4. おわりに

本稿では，Self-empowerment Driving Vehicleにおける，下肢に障がいをもたれた方に焦点を当て支援するための技術開発について紹介した。今後も下肢に障がいをもたれた方への支援の更なる改善を継続すると同時に，対象とするお客様を拡大することで「多くの人々へカーライフを通じた人生の輝きの提供」の実現に引き続き取り組んでいく所存である。

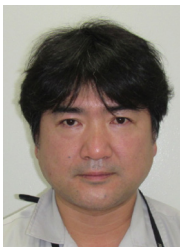
参考文献

（1）JIS Z 8520-2008：人間工学―人とシステムとのインタラクション―対話の原則：日本規格協会，（2008）

■著　者■

栃岡 孝宏

田内 一志


前堂 勝久

山本 友也

和泉 知示

石崎 大智

富井 圭一

任田 功

岩瀬 貴志

論文・解説

16

新型 1.5L ガソリンエンジンの紹介
Introduction of a New 1.5-Liter Gasoline Engine

小田　裕介 *1　上村　匠 *2　吉田　健 *3
Yusuke Oda　Takumi Uemura　Ken Yoshida
山内　道広 *4　西田　智宣 *5　平林　千典 *6
Michihiro Yamauchi　Tomonori Nishida　Kazunori Hirabayashi

要　約

マツダは技術開発の長期ビジョン「サステイナブル “Zoom-Zoom” 宣言 2030」に基づき，クルマのもつ魅力である「走る歓び」を通じて，地球・社会・人それぞれの課題解決を目指す新しいチャレンジに取り組んでいる。更に，2050 年のカーボンニュートラルに挑戦することを表明した。このビジョンの実現に向けて，SKYACTIV-G 新型 1.5L エンジンは，特に燃費性能を重視し，走行性能を犠牲にすることなく，内燃機関の効率を徹底的に追求し，「走る歓び」と「優れた環境性能」を更に進化させた。本稿ではこのエンジンの諸性能と採用技術について紹介する。

Abstract

Under its long-term vision for technology development “Sustainable Zoom-Zoom 2030”, Mazda has been pursuing a new challenge with an aim to solve issues facing the earth, society and people through “driving pleasure”, the fundamental appeal of the automobile. The company has also announced its endeavor for carbon neutrality by 2050. To proceed toward the realization of the vision, Mazda developed the new 1.5-liter Skyactiv-G engine with a particular focus on fuel efficiency. The engine has thoroughly pursued the efficiency of the internal combustion engine without sacrificing running performance and further evolved “driving pleasure” and “outstanding environmental performance”. This paper introduces various performances of the engine and technologies adopted for it.

Key words : Heat engine, Spark ignition engine, Performance/Fuel economy/Efficiency, Mixture formation

1. はじめに

マツダは，将来においても地球・社会・人とクルマが共存する世界を思い描き，ライフサイクルアセスメントの考え方の下で CO_2 削減効果の最大化を目指している。当社は，2030 年グローバル生産電動化比率 100%を想定し，各地域における動力源の適性やエネルギー事情・発電構成を踏まえ，適材適所の対応を可能とするマルチソリューションを軸としたアプローチをとっていく。ハイブリッド車においても，その効果を十分発揮させるには，ベースとなる内燃機関の性能が重要であることはいうまでもなく，さらなる CO_2 改善の継続的改善が必要である[1,2]。本稿では，クラス概念を打ち破る軽快なパフォーマンスと，優れた燃費・環境性能を発揮する新開発 1.5L エンジンの織り込み技術を紹介する（Fig. 1）。

Fig. 1　SKYACTIV-G 1.5

*1　エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.
*3〜5　エンジン設計部
Engine Design Engineering Dept.
*2　MBD 革新部
MBD Innovation Dept.
*6　PT 制御システム開発部
PT Control System Development Dept.

2. エンジン開発コンセプト

マツダでは，2019 年に SKYACTIV-X を市場導入し，日本燃焼学会「技術賞」を受賞するなど，高い評価を得ている。更なる地球環境負荷低減を推進していくためには，従来機種においても一層の CO_2，粒子状排気物質（PN：粒子数／PM：粒子重量）の低減が求められる。今回紹介する新型 1.5L ガソリンエンジンでは，SKYACTIV-X の開発にて培った技術の一部を従来機種にも展開することにより（Fig. 2），パフォーマンスを損なうことなく，環境性能を底上げすることを第一目標として開発を行った。

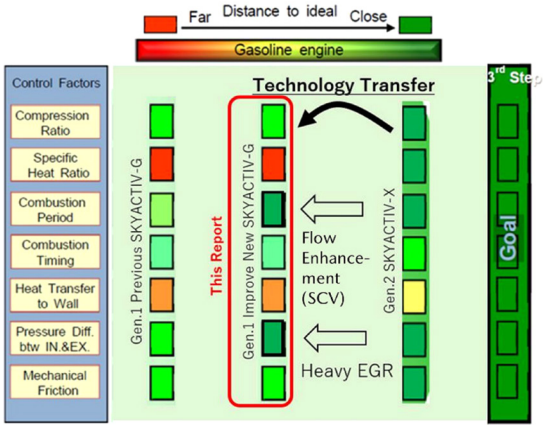


Fig. 2　Development Concept

Table 1　Dimension and Specification

Engine		Current 1.5 L	New SKYACTIV-G 1.5 L
Engine Type		In-line 4	←
Displacement（cc）		1496	←
Bore×Stroke（mm）		Φ 74.5×85.8	←
Compression Ratio		12.0	14.0
Combustion Chamber		Cavity Piston	Flat Piston
Intake-valve Time	Open（BTDC）	−36〜38	←
	Close（ABDC）	110〜36	←
Exhaust-valve Time	Open（BBDC）	14〜59	14〜69
	Close（ATDC）	5〜50	−5〜50
Int. S-VT		Electric	←
Ex. S-VT		Hydraulic（0〜45）	Hydraulic（0〜55）
Fuel Injection		DI	←
Swirl Control Valve		w/o.	w/.
Cooled EGR		w/o.	w/.
Max Power		81kW/ 6000rpm	←
Max Torque		141Nm/ 4000rpm	142Nm/ 3500rpm
Fuel Octane Number		RON 90	←

3. エンジン諸元

今回の新型エンジン主要緒元を Table 1 に示す。基本骨格は，従来エンジンから引き継ぎつつ，燃費，エミッションの改善メニューとして，SKYACTIV-X での織り込み技術である以下の 2 点を採用した。

・スワールコントロールバルブ（SCV）
・クールド EGR システム

4. 燃焼改善技術

ガソリンエンジンでは，燃焼室内の混合気状態が燃費や排気ガス特性に大きな影響を及ぼす。新型エンジンでは SCV の採用により，筒内混合気の流動を斜め渦状とし，流動に燃料噴霧を当て，点火プラグ付近に混合気を集め，燃焼速度を上げる新燃焼技術「斜め渦燃焼 Diagonal Vortex Combustion」を適用することで，燃費（WLTC モード従来比最大 6.8%向上），エミッション PN（WLTC 現行比 57%低減）の改善を行った。

本章では，斜め渦燃焼の概要（4.1），新燃焼技術による燃費改善（4.2），エミッション改善（4.3），及び新燃焼技術の構築により生じた弊害への対応（4.4）を紹介する。

4.1 「斜め渦燃焼 Diagonal Vortex Combustion」の概要

Fig. 3 に従来エンジンと，新流動形態を適用した新型エンジンにおける混合気の流線を示す。

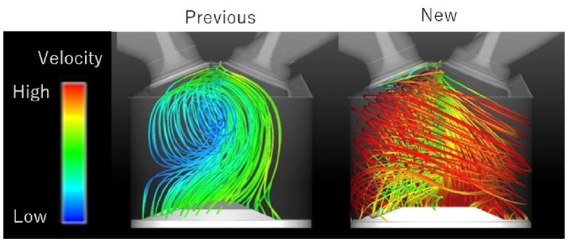


Fig. 3　Comparison of In-Cylinder Flow in Compression Process

従来エンジンでは，タンブル流（縦渦）を主とした流動形態としていたものに対し，新型エンジンでは運転条件に応じてスワール流（横渦）を付与することで，上図のような斜め渦（Diagonal Vortex）を形成させている。この混合気形態は Fig. 4 に示す SCV により，吸気行程中に斜め渦流動を生成，更に Fig. 5 に示すピストン形状の最適化によって，圧縮行程後半までこの流動形態を維持させている。

新型エンジンでは，この斜め渦流動を活用することにより，以下 2 つの機能を得ている。

① 燃焼急峻化
② 混合気制御性の向上

以降の項目にて，これらの機能を活用した燃費，PN/PM 改善技術を紹介する。

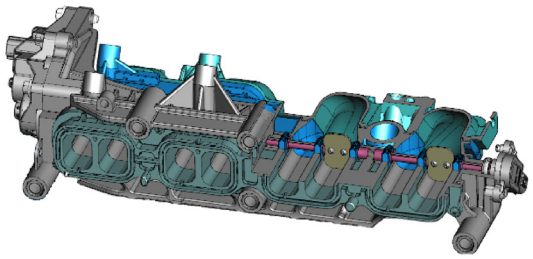


Fig. 4　Swirl Control Valve

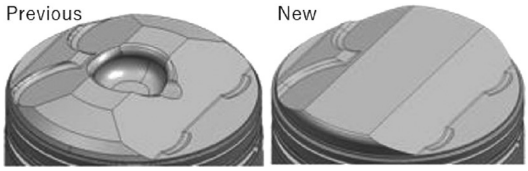


Fig. 5　Comparison of Piston Shape

4.2　新燃焼技術を活用した燃費改善

まずは先述した斜め渦燃焼による機能①（燃焼急峻化）を活用した燃費改善技術を説明する。これまでの開発経験において，EGR 量を増加させることによって，ポンプロスを低減でき，燃費を改善できる一方で，燃焼速度の低下による燃焼安定性，及び排気損失の悪化が課題となっていた。これに対して，Fig. 3 で示したとおり，新型エンジンでは流動形態を刷新し，圧縮行程後半まで渦中心を斜めに傾けた状態を維持させることにより，点火時においても燃焼室中央部の点火プラグ周辺に強い流動を配置することができ，初期燃焼から急峻化させることができている。これにより燃焼速度が向上し，これまでの開発課題となっていた EGR 導入によるポンプロス改善と燃焼速度悪化のトレードオフをブレークスルーすることができた（Fig. 6）。

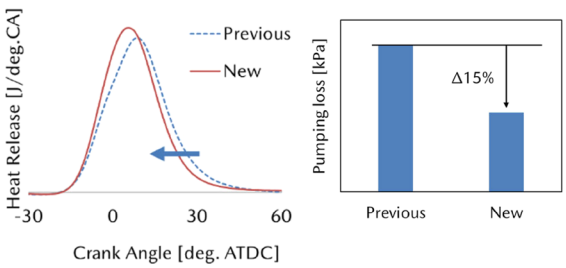


Fig. 6　Heat Release and Pumping Loss

また，新燃焼技術によるイネーブラを最大限に活用するため，EGR システムも刷新した（Fig. 7）。具体的には，流量制御性に優れたバタフライ式 EGR バルブを採用することにより，燃焼安定性を損なわない範囲内で限界まで EGR を導入することが可能になった。更に，レイアウトの工夫によって EGR 経路を最短とすることで，レスポンス性と車両への搭載性も向上している。ユニット単体での，新旧燃費率マップ比較を Fig. 8 に示す。白枠で示す燃費良好な領域が，SCV，クールド EGR システム，及び EGR バルブの導入により大きく拡大した。これらにより WLTC モード従来比最大 6.8%の車両燃費改善に貢献した。

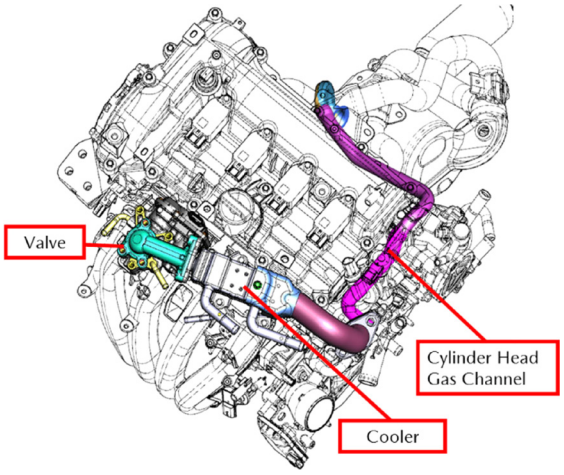


Fig. 7　Cooled EGR System

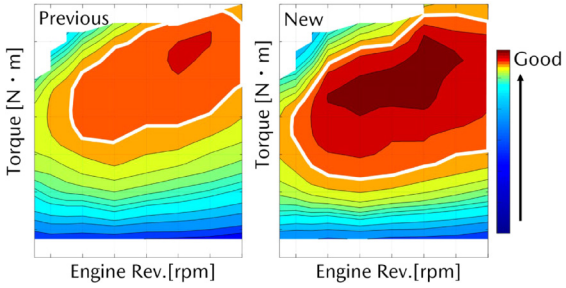


Fig. 8　Fuel Consumption Map

4.3　新燃焼技術を活用した PM/PN 改善

次に，斜め渦燃焼による機能②（混合気制御性の向上）を活用したエミッション改善技術について説明する。ガソリンエンジンでは，触媒の早期暖気を行うため，冷間始動直後に点火タイミングを膨張行程まで大幅にリタードし，排気ガス温度を上昇させる必要がある。その結果，点火タイミングにおける燃焼室内の温度低下により着火性が悪化するため，点火プラグ周辺に着火性の良い濃い混合気を集める（成層する）必要がある。従来エンジンでは，圧縮工程後半にピストンに噴霧を衝突させることによって，燃料をプラグ周辺に輸送（Wall Guide）していた。しかし，その際にピストン頂面に生じる燃料液膜が，PN の発生要因となっており，トータル排出の大部分を占めていた。そのため，新型エンジンでは Wall Guide 成層方式を廃止し，先述した新たな流動形態を活用した Air Guide 成層方式を採用している。Fig. 9 に Air Guide 成層方式の模式図を示す。

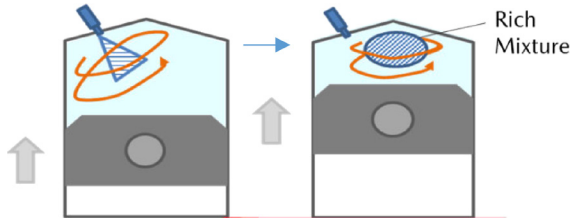


Fig. 9　Image of Air Guide Process

この Air Guide 成層方式では，SCV 開度を調整し，インジェクタ先端に流速の遅い渦中心を配置することによって，流動と噴霧が干渉することなく，燃焼室中央部に燃料を噴射することができる。渦中心に噴射された燃料噴霧は，ピストンにほとんど衝突することなく中心部で漂い蒸発する。蒸発した燃料は，拡散することなくピストンの上昇によってプラグ近傍に輸送される。

Fig. 10 に従来型の Wall Guide 方式と新型の Air Guide 方式での点火時混合気分布の解析結果を示す。混合気形成過程は異なるものの，燃焼安定性に必要とするプラグ近傍燃料濃度を実現できており，実機検証においても従来エンジンと同等の燃焼安定性を有していることを確認している。

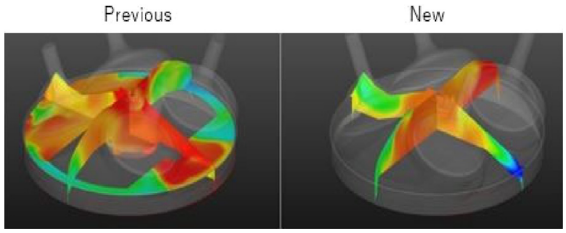


Fig. 10　Comparison of A/F in Cylinder at Ignition Timing during Catalyst Warming

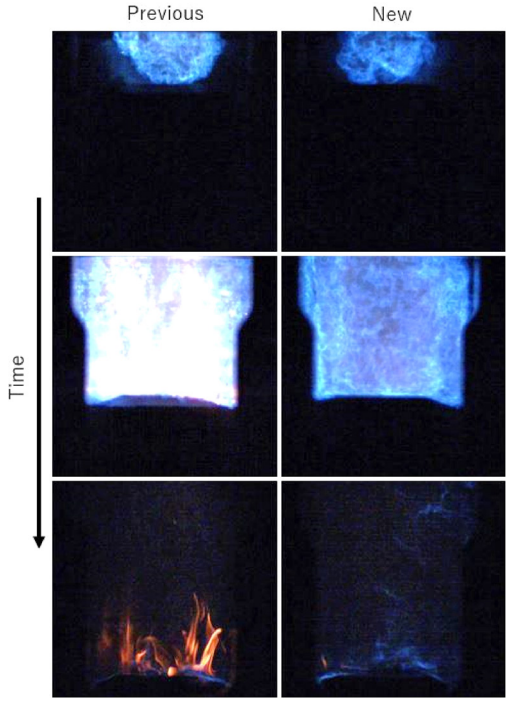


Fig. 11　Comparison of Flame during Catalyst Warming

また，可視化エンジンにて両者の燃焼を観察した結果，新型エンジンでは PN・PM 発生と相関があると考えられている輝炎（オレンジ色の火炎）を大幅低減できていることを確認できた（Fig. 11）。PN の実測結果においても，WLTC モードで現行比 57%粒子数低減できていることを確認した（Fig. 12）。

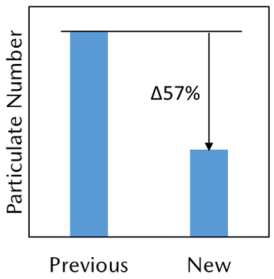


Fig. 12　Particulate Number

4.4　新燃焼技術の構築による弊害と対応

Fig. 13 に従来エンジンと新型でのインマニ／吸気ポートの通路断面形状を示す。

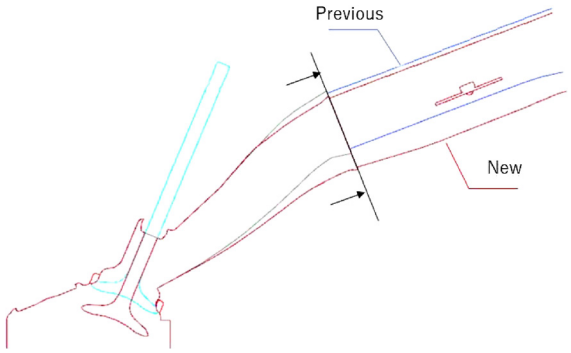


Fig. 13　Comparison of Intake Port

斜め渦流動を生成するための SCV は，応答性が優れているバタフライ式 SCV を採用し，市街地走行で使用頻度が高い部分負荷域での燃焼改善を行い，高速高負荷はシリンダーヘッドの吸気ポートと併せてインマニランナーを最適形状とすることで，現行比同等の吸気 Cf を担保した。またこの変更により，タンブル比も改善することができている（Fig. 14）。

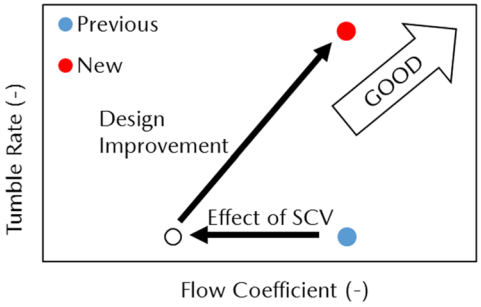


Fig. 14　Evolution of Intake System

5. おわりに

SKYACTIV-G 新型 1.5L エンジンは，お客様とクルマがもつ「自由」という価値の最大化に向き合い，自分らしく生きるとともに，大切なご家族やご友人と過ごす貴重な時間においても，豊かな人生を楽しんで頂けることを目指し開発を行った。コモンアーキテクチャ構想に基づき，今後本技術を排気量が異なるエンジンにも展開し，全てのお客様に優れた環境性能と走行性能をお届けしていく。

参考文献

(1) 西田ほか：新世代 C セグメント向け「SKYACTIV-G 2.5T」の紹介，マツダ技報，No.37，pp.12-18（2020）
(2) 西田ほか：新型 2L 直列 4 気筒「SKYACTIV-X」のエンジン技術，マツダ技報，No.36，pp.51-58（2019）

■著　者■

小田 裕介

上村 匠

吉田 健

山内 道広

西田 智宣

平林 千典

論文・解説

17

視認行動と運転操作に基づくドライバー体調急変の早期検知技術

Early Detection of Deterioration of Driver's Physical Conditions from Driver's Viewing Action and Driving Action

桑原　潤一郎 *1　岩瀬　耕二 *2　岩下　洋平 *3
Junichiro Kuwahara　Koji Iwase　Yohei Iwashita
山本　康典 *4　一杉　正仁 *5
Yasunori Yamamoto　Masahito Hitosugi

要　約

運転中の体調変化による死亡事故は全体の約 10%を占めるといわれており，昨今においてもドライバーだけでなく周囲の人を巻き込む凄惨な事故が発生している。このような事故を防止するには，早期にドライバーの体調変化を検知し，ドライバーの早期救命や周辺の二次被害防止に向けた対応が必要である。

マツダでは，人間中心の自動運転技術である Mazda Co-Pilot Concept（普段はドライバーの能力を最大限に発揮することを助け，危険が生じた場合にはクルマがオーバーライドして安全を確保）に基づき，ドライバーの走る歓びや安心・安全を最大化することを目指しており，その一環として，万が一ドライバーが運転できないと判断した場合には自動運転に切り替え，周囲を含めて安全な状態を確保する技術を開発している。本稿では，ドライバーの体調変化による運転機能低下をとらえる技術と今後の展望について紹介する。具体的には，運転機能低下を通常運転からの逸脱として検知するため，通常の視認行動や運転操作を規定するドライバーモデル（以下，モデル）を構築した。また，体調起因の死亡重傷事故の約 3 割を占める脳卒中を例に，後遺症をもつリハビリ患者及び健常者のドライビングシミュレータ運転データからステアリング操作や視認行動が異なることを明らかにし，体調変化による運転不能前の検知の実現可能性を確認した。今後は実交通環境への適用や検知性能向上のための取り組みを進め，早期商品化を目指す。

Abstract

About 10% of fatal traffic accidents is caused by the deteriorations of drivers' physical conditions during driving. In order to prevent such fatal accidents involving surrounding people, it is necessary to detect sudden changes in driver's physical conditions at an early stage. We aim to maximize safety as well as driving pleasure, centering on Mazda Co-Pilot Concept, a human-centered autonomous driving technology. As part of this technology, we have been developing a technology that allows the car to take over driving operations when it detects driver's disability of driving. Here we introduce the technology of earlier detection of driver's worsened conditions to prevent accidents.

Key words : Human Engineering, Driver Condition, Driver Attention, Driver Model

1. はじめに

平成 30 年における国内の交通事故死亡者数は 3,532 人であり，先進安全技術の進歩によってその数は減少傾向にあるが，未だ多く死亡事故が発生している。これら死亡事故の原因は安全運転義務違反等のヒューマンエラーが多くを占めており，脇見やふらつきに対して警報する安全システムの開発等の対応が進んでいる。一方，ドライバーの意思では防ぎようのない運転中の体調急変が全体の約 1 割を占めると報告されており[(1)]，実際に周囲の人を巻き込む重大な事故が発生している。このような事故を未然に防止するため，国土交通省はドライバーの異常姿勢，閉眼，ハンドル無操作に基づき，体調急変による運転不能状態を検知するドライバー異常時対応シ

*1〜4　統合制御システム開発本部
Integrated Control System Development Div.
*5　滋賀医科大学
Shiga University of Medical Science

ステムのガイドラインを 2018 年に策定した。更に，意識消失に至らずとも運転に影響が出ている状態を早期に検知するための検知指標も 2019 年にガイドラインへ追加された。実際に体調起因事故原因の約 3 割を占め[(2)]，年間約 29 万人が罹患する脳卒中では，視野障害や運動障害等で一部の運転機能が低下した状態で運転を継続し，最終的に事故に至った事例も報告されている[(3)]。以上より，ドライバーの意識消失をとらえることも重要だが，ドライバーの運転機能低下を早期に検知して事故の未然防止やドライバーの救命に努める必要があると考える。Mazda Co-Pilot Concept では意識消失による姿勢崩れに加え，運転不能の予兆となる運転に関する人の機能低下を，視認行動や運転操作等から検知し，いざという時は運転の主導権をドライバーから自動運転システムへ切り替えることで事故の未然防止やドライバーの救命の実現を目指している（Fig. 1）。本稿では，ドライバーの機能低下検知機能を実現するため，通常の視認行動や運転操作をモデル化し，そこからの逸脱より運転機能低下を検知できることを，後遺症をもつ脳卒中患者のドライビングシミュレータ（以下，DS）運転データで検証した結果，及び実走行環境への適用を検証した結果について紹介する。なお，本稿に結果を掲載している全ての実験は，マツダ(株)及び滋賀医科大学の協力先である近江温泉病院の倫理委員会の承認を得た上で，事前に被験者へ実験内容を書面にて説明し，インフォームドコンセントを得て実施した。

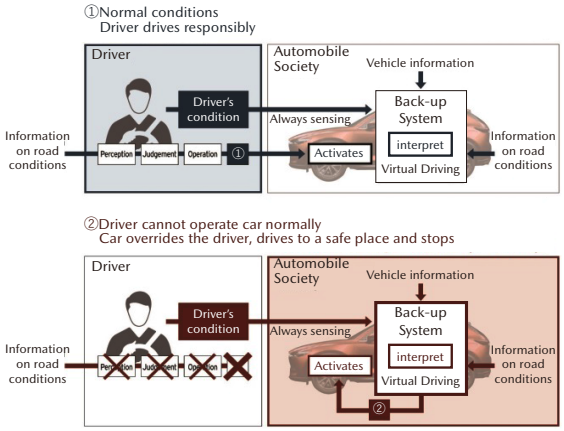


Fig. 1　Mazda Co-Pilot Concept

2. 検知のアプローチ

運転不能の予兆を検知するためには，脳卒中等の症状が運転機能に与える影響を理解する必要がある。運転の機能的側面に着目すると，物陰からの飛び出しに備えて徐行する等の予測的な運転を行う高次機能，道路に沿って車線を走行する等の低次機能，運転姿勢の保持等の不随意機能に大別できると考える（Fig. 2）。

疾患の種類やその症状，及び走行環境によって各機能にさまざまな影響が出ることが想定される。あらゆる走行環境で疾患による運転機能の低下をとらえるためには，機能低下により変化が現れる視認行動や運転操作などの意識的な行動変化，姿勢維持などの無意識的な反応変化などを用いた統合的な判定が有効である。しかし，原因疾患から人体が受ける影響はさまざまであるため，疾患ごとに運転特性変化を明らかにする必要がある。そこで，個別に検知方法を検討するのではなく，“通常運転からの逸脱”という観点でドライバーの機能低下を検知することとした。上記考えに基づいた運転機能低下検知の実現には，まず通常のドライバーの視認行動や運転操作を規定する必要がある。そのため，まずは人のメカニズムに基づいた視認行動モデルや運転操作モデルを規定し，これらからの逸脱としてドライバーの機能低下をとらえるアプローチをとる。本稿ではこのうち，高次機能と低次機能に関連する視認行動と運転操作のモデル化，及びそれらに基づく運転機能低下検知技術開発の取り組み状況について説明する。

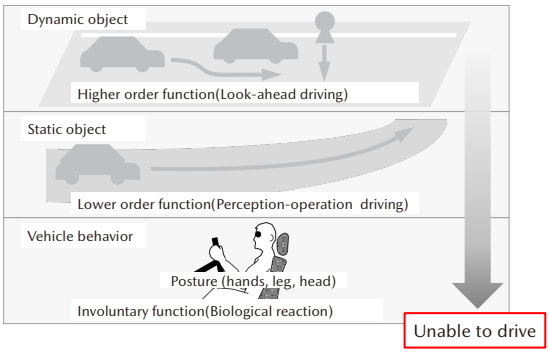


Fig. 2　Driving Functions

3. 視認行動による機能低下検知技術

3.1　視認行動モデル構築と妥当性検証

（1）視認行動モデル構築

人は注意を向けた個所に視線を向けると言われている[(4)]。注意には視覚刺激に受動的に注意が惹きつけられるボトムアップ注意と，目標刺激に能動的に注意を向けるトップダウン注意がある[(5)]。運転中は目立つ個所に向けられたボトムアップ注意と危険個所等の見るべき個所に向けるトップダウン注意が働き，最も多く注意を向けた個所に視線を向けると考えられる。

ボトムアップ注意として，人は目立つ対象に注意を引かれる特性をもつ。そのため，運転中の走行風景の顕著性（目立ち度合）の算出可能な方法のひとつである Itti らのサリエンシーマップ[(6)] を基に，運転中の速度増加に伴い有効視野が感度低下する人間の特性（Fig. 3）を考慮した顕著性の指標（以下，サリエンシー指標）を検討した[(7)]（Fig. 4）。ここで，Fig. 3 は感度が高い箇所を青色，低い箇所を赤色で示している。また，Fig. 4 は顕著性が

高い箇所を赤色，低い箇所を青色で示している。

一方，トップダウン注意として，人は運転中にリスクとなる対象を見つけた場合，対象へ注意を向けつつその他の対象にも注意を残して周辺状況も含めて把握できるよう行動する。そのため，このようなリスクが一定以上高い走行環境においては，サッケード（素早い眼球運動）の振幅が一定以上の水準に保たれるという特性も考慮する必要がある。

以上より，体調急変の影響によってドライバーの高次機能が低下した場合，トップダウン注意の割合が減少してボトムアップ注意の影響が強まると想定され，サリエンシー指標の増加やサッケード振幅の減少が表れると仮定した。なお，リスクの高さは自動走行の経路生成でも応用されるリスクポテンシャル（Risk potential method，以下，RP）法[8] を用いて定量化した。

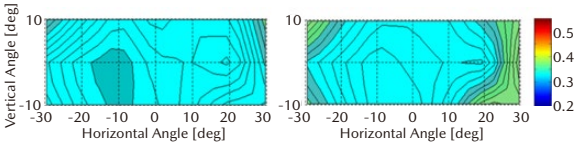


Fig. 3　Sensitivity Map of Saliency

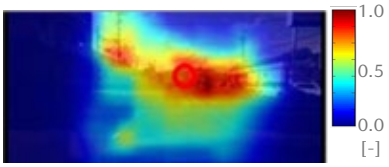
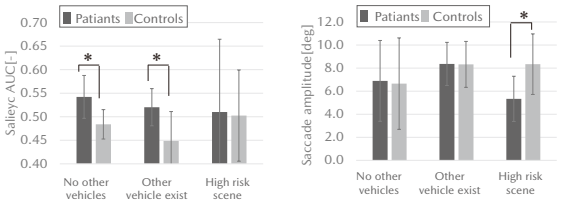


Fig. 4　Improved Saliency Map

（2）モデルの妥当性検証

構築したモデルの妥当性，及び高次機能低下にともなう視認行動変化の仮説を検証するため，脳梗塞により高次機能障害（注意障害）を発症した患者の DS 運転中の視認行動を分析した。実験は安全を考慮して定置型の DS を用いた。被験者には通常の運転タスクのみを行ってもらい，その際の視認行動を計測した。視線は Tobii 社製 Glass2（サンプリングレート 100Hz）を用いた。被験者は患者 5 名，健常者 4 名であった。走行環境は，カーブや交差点を含む単独走行や周辺他車両がいる標準的な市街地とし，1 回の走行時間は被験者の負担を考慮して 5 分程度とした。解析は，走行環境を単独走行時，先行車存在時，駐車車両追い越し時（高リスク）の 3 つに分割し，走行環境ごとにサリエンシー指標とサッケード振幅を計算した。その結果を Fig. 5 に示す。

単独走行及び周辺車両がある状況では，患者群で有意にサリエンシー指標が大きい結果であった。これらの走行環境では，患者群は進行方向に加えて周辺の樹木等のサリエンシーが高い（目立つ）エリアを見る傾向があった。健常者群は周辺のサリエンシーが高いエリアの影響をあまり受けずに危険探索を適切に行っていたため，サリエンシー指標が患者に比べて小さかった。この理由について，高次機能が低下している患者はボトムアップ注意が有意になり，目立つ対象へ視線を向ける頻度が多くなったためだと考える。また，駐車車両を追い越す状況では患者群のサッケード振幅が有意に小さい結果（p＝0.044＜0.05）であった。健常者群では危険対象以外の周囲にも視線を向ける傾向があったのに対し，患者群では危険対象に視線が集中する傾向があった。患者群は注意障害の影響で複数の対象への注意配分が十分にできなかったためだと考える。以上より，構築した 2 つの視認行動モデルが想定していた走行環境において有効であることを確認できた。



(a) Saliency Indicator　　(b) Saccade Amplitude

Fig. 5　Confirmation Result of Visual Behavior

3.2　視認行動に基づく機能低下検知可能性確認

3.1 節で得られた被験者の DS 運転時のデータを用いて，注意障害患者群を体調急変による機能低下が生じている状態，健常者群を正常状態として機能低下検知ロジックの検証を行った。機能低下検知ロジックは 3.1 節で規定した 2 つの視認行動モデルにそれぞれ判定閾値を設け，注視箇所の顕著性が一定水準以上，あるいはリスク発生時のサッケード振幅が一定以下になる場合に検知するものとした。その結果，精度（True Positive＋True Negative）は時間割合にして 80.5%となり，全体的に精度よく検知できていることを確認した（Table 1）。患者群に対して未検知が生じたのは，直進走行時に進行方向とその周辺を注視した場合や周辺交通が少ない交差点右左折時に左右の安全確認を行っていた場合など適正に周辺を見ることができていた場合であった。一方，健常者群に対して誤検知が生じたのは，停車中に周囲の運転に関連のない風景を見た場合や自車進路に侵入しようとしているトラックを注視しサッケード振幅が減少した場合など危険対象の動静を把握するためにしばらく注視が持続した場合であった。

Table 1　Result of Model Accuracy

		Predicted Values	
		Positive (Patient)	Negative (Control)
Actual Values	Positive (Patient)	35.5%	14.5%
	Negative (Control)	5.0%	45.0%

3.3　実交通環境への適用可能性検討

実交通環境では DS と違い，さまざまな交通状況が発生する。構築した視認行動モデルに基づく機能低下検知ロジックの課題を洗い出すため，実車運転へ適用して誤検知性能を確認した。実験は市販車にドライバーモニタカメラを設置して計測を行った。走行コースは一般的な市街地，高速道路，ワインディング路，住宅地を含む全長約 65km，走行時間 2h 程度のコースとした。被験者は正常な健康状態を有する 20〜50 代の 5 名（Sub.1〜5）とした。検証結果を Fig. 6 に示す。提案モデルは正常ドライバーを機能低下が生じている状態と判定した誤判定率は平均 10%程度であった。

実車環境で誤判定が生じた支配要因は以下であり，それぞれが生じた割合は①が 65%，②が 35%であった。
①リスクが低い走行環境において，先行車や対向車などの通常運転中に見る対象物を見た場合。
②渋滞による低速走行時や大型トラックに追い越される際などのリスク高い走行環境で危険対象を注視し続けた場合。

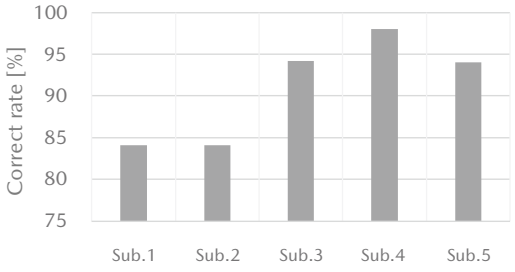


Fig. 6　Correct Rate of Each Subjects

上記原因について，本モデルでは注視対象物の種類や距離といったトップダウン注意の要素や年齢，運転経験等の個人差に関わる要因を組み込めていないこと，漫然や覚醒低下などの一時的な状態変化と区別できていないことがある。一時的な状態変化に対しては，車側からの注意喚起に対してドライバーが正常状態に復帰したかを判定することで一時的な状態変化と異常状態を判別できると考える。また，トップダウン注意の要素と個人差に関わる要因の組み込みについては，対象物の情報は ADAS（Advanced Driver-Assistance Systems）用のセンシングカメラなどから容易に取得できるため，ドライバーが注意を向けた対象が通常運転中に見る対象物であるかを判定すること，個人差要因については，個人ごとに普段の状態を学習して 普段の状態からの逸脱を検知した場合に異常予兆と判定することで解決できると考える。

4. 運転操作による機能低下検知技術

4.1　運転操作モデル構築と妥当性確認

（1）運転操作モデル構築

運転行動には単調な走行環境で行う車線維持や速度調整等の低次機能に基づく行動と，複雑な走行環境で行う周辺確認や予測等の高次機能に基づく行動がある。本稿では，このうち低次機能に基づくステアリング操作モデルについて説明する。ドライバーを車両の制御装置とみなした制御工学ベースのモデルは数多く提案されている[9][10]。しかし，実際はカーブの曲率や車速等の環境・車両因子に応じてドライバーの運転特性（制御ゲイン）が変化しているため，従来のモデルを実環境へ適用するのは困難である。そこで，ドライバーの運転特性が環境・車両因子から受ける影響も含めて表現したモデルを構築した[11]（Fig. 7）。基本は前方注視モデルであり，曲率に対するステアリング操作量を規定するフィードフォワード（以下，FF）ゲインに加え，車線内での横位置や横速度に対する 2 つのフィードバックゲイン（以下，FB）から構成されている。更に，各ゲインの基本値に環境・車両因子の影響による変動値を加算する構造とし，運転特性の変化も含めて表現したモデルである。上記の影響は解釈可能な機械学習モデルを構築可能な階層ベイズでモデル化し，各ゲインの値，及び環境・車両因子の影響は，全員に共通する固定効果と個人による変量効果をそれぞれ学習可能とした。各因子とゲインには非線形な関係が含まれることが想定されるため 3 次式で定義するものとした。ひとつのゲインに対するモデル式と変数の定義を式(1)(2)，及び Table 2 に示す。

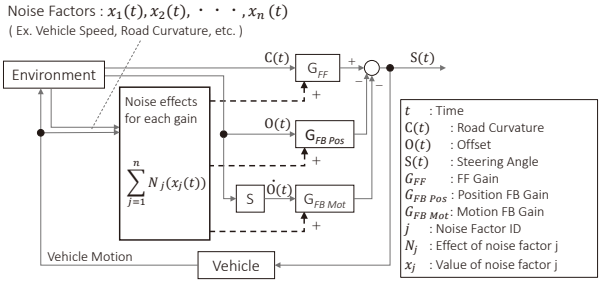


Fig. 7　Steering Model incl. Driving Characteristics

$$G_i(t) = G + \zeta_i + \sum_{j=0}^{n} N_{ij}\left(x_j(t)\right) \quad (1)$$

$$N_{ij}\left(x_j(t)\right) = (a_j + a_{ij})x_j(t)^3 + (b_j + \beta_{ij})x_j(t)^2 + (c_j + \gamma_{ij})x_j(t) \quad (2)$$

Table 2　Hierarchical Bayes Model Variable Definitions

	Meanings		Meanings
i	Subject ID	N_{ij}	Effect of noise factor j for the gain
j	Noise factor ID	$x_j(t)$	Value of noise factor j at time t
$G_i(t)$	Control gain at time t	n	Number of noise factors
G	Fixed effect of the gain	a_j, b_j, c_j	Fixed effects of coefficients
ζ_i	Random effect of the gain	α_{ij}, β_{ij}, γ_{ij}	Random effects of coefficients

（2）モデルの妥当性検証

モデルの妥当性検証のため，ステアリング操作に大きく影響すると考えられる左同名半盲（両眼の視野が左半分見えなくなる症状）を発症した患者の運転操作解析結果を説明する。計測環境は 3.1 節で述べたものと同じであり，被験者は 20 代～40 代の健常者 4 名（Sub.1～4）と 40 代の左同名半盲患者 1 名（運転リハビリ開始直後）とした。本来は，個人ごとに通常状態での制御ゲインを学習した上でモデルによる操作推定を行うべきだが，疾患発症前の患者の運転特性を知ることはできない。そのため，今回は健常者の制御ゲインの平均値をモデルに適用して各被験者の操作を推定し，実操作との誤差を求めた（Fig. 8）。その結果，患者は健常者に比べて誤差分布が広く，機能低下状態では想定どおりドライバーの操作と構築したモデルに乖離が生じることを確認できた。

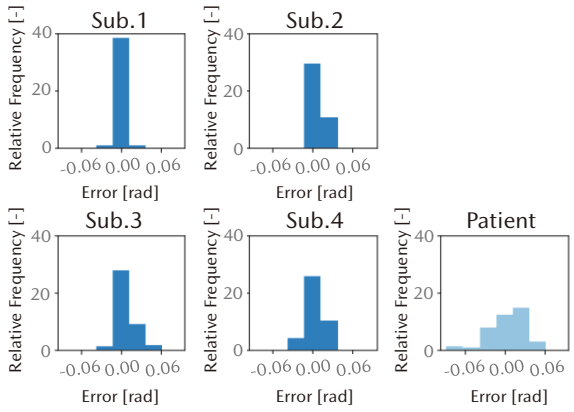


Fig. 8　Distribution of Steering Operation Estimation Error

4.2　ステアリング操作に基づく機能低下検知可能性確認

通常操作を規定したモデルとドライバーの実操作の乖離から視野障害による運転機能低下を検知できることを確認する。単に推定誤差の大きさやその分散を評価指標とすると，想定していない走行環境や一時的な脇見等で大きな誤差が発生した際に誤判定する可能性がある。そこで，モデルからの乖離度合いの数値手法として，確率分布の違いを指標化できるカルバックライブラー情報量（以下，KLD）を用いる。一定時間の誤差分布を確率分布としてとらえ，あらかじめ学習しておいた普段の誤差分布と比較し，誤差が拡大した場合に運転機能が低下したと判断する。なお，KLD は正の値のみをとるが，誤差の拡大のみをとらえるために誤差分布が学習データよりも縮小する場合は負の値として計算した。また，KLD を計算する際の比較対象には，健常者 4 名の誤差分布を平均したものを用いた。その結果，患者は KLD が健常者の 18 倍以上となり，通常運転からの逸脱による運転機能低下の検知可能性を確認できた（Fig. 9）。

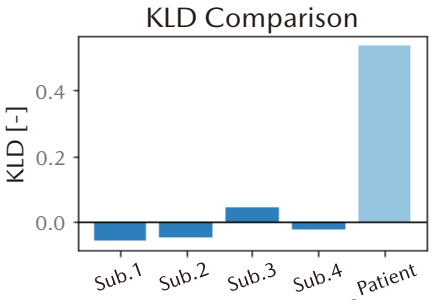


Fig. 9　Evaluation Result of Estimation Error

患者のステアリング操作とモデルによる推定値を Fig. 10 に示す。モデルでは 2 秒時点でステアリングを右に切る（操舵角がマイナスになる）と推定されているが，患者は 4 秒時点でステアリングを大きく切っている。車線内での自車位置の知覚には周辺視で獲得した情報が使われるとの報告[12] より，視野にとらえた左右車線の距離バランスが重要だと考えられる。視野半減によって片方の車線をとらえられなくなったため，感度が大幅に低下したと推察される。また，直線区間での車線中央からのずれ量（Fig. 11）は健常者平均 0.1m に対し，患者は 0.28m であることから，患者は位置知覚感度が低下していることで車線中央からのずれ量の知覚が遅れ，車線逸脱を防ぐために大きな操舵をしたと解釈できる。

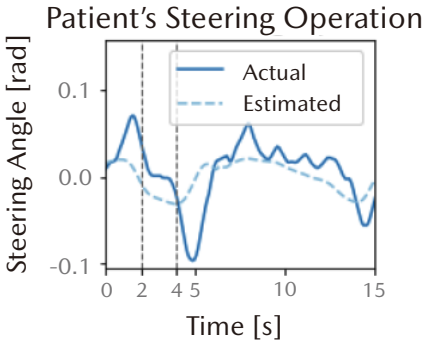


Fig. 10　Patient's Steering Operation

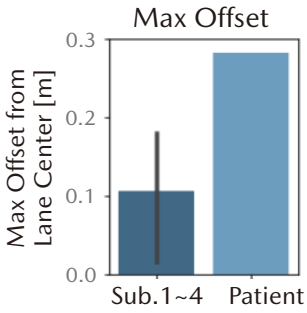


Fig. 11　Maximum Offset in Straight Section

4.3　実交通環境への適用可能性検討

従来の運転操作モデルに対し，環境・車両因子による運転特性変化を織り込んだ効果を確認するため，実車運転データへ検知ロジックを適用した。計測には市販車を

使用し，運転操作と前方カメラによる車線認識情報を含む CAN 情報，と車両前後の映像を 100ms 周期で計測した。コースは高速道路約 230km（首都高，中央道，東名高速），住宅地や山岳路を含む神奈川県の一般道約 60km とし，被験者は 30〜50 代男女 9 名（Sub.1〜9）の健常者とした。その結果，走行環境や車両状態による運転特性の変化を表現した階層ベイズ適用後は，操作推定誤差のばらつきが平均 43.8%減少した（Fig. 12）。これに伴い，局所的に KLD が患者水準以上であった走行環境で同水準を下回ることを確認できた。その一例を Fig. 13 に示す。

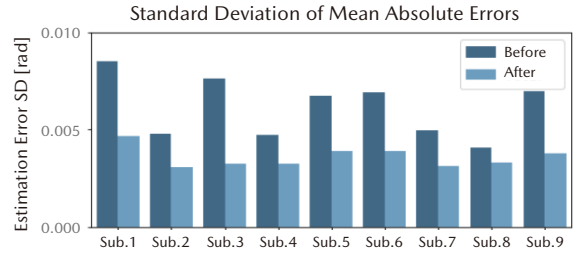


Fig. 12　Improvements of Prediction Accuracy Stabilities

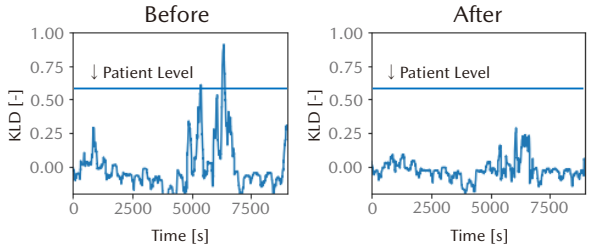


Fig. 13　KLD Improvement of Sub.9

階層ベイズで学習した環境・車両因子の影響の一例として，車速が各ゲインに与える影響を Fig. 14 に示す。FF ゲインと車速は 2 次関数的な比例関係になった。これは車速が上がるほどスリップアングルが増加し，車両の向きを変えるために必要な操舵量が増加することから，曲率に対する操舵量の比である FF ゲインが速度の増加に伴い大きくなることを表現していると解釈できる。FB ゲインは双方とも車速と反比例の関係であった。これは車速が上がるほど操舵量に対する発生横速度が大きくなるため，高速走行ほど修正操舵が小さくなる現象を表現していると解釈できる。モデル改良前に KLD が大きく計算されたのは高速でカーブが連続する区間（東名高速の御殿場 IC 〜大井松田 IC 間）であることより，このような状況での運転特性の変化をモデル化したことで推定誤差を減少できたと考えられる。

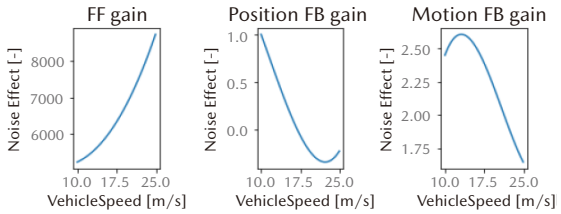


Fig. 14　Effect of Vehicle Speed on Each Gain

5. おわりに

本稿では，人間の高次機能に基づく視認行動モデルと，低次機能に基づく運転操作モデルの構築，及びそれらに基づいた機能低下検知技術について紹介した。今後は無意識的な姿勢維持などの不随意機能の変容をとらえる技術も併せて，あらゆる体調急変による運転機能低下を検知可能な技術の開発を進め，早期商品化を目指す。また，眠気や漫然状態，加齢による影響など，ドライバーの状態をきめ細かに推定可能にし，より安心・安全なクルマ社会を実現していきたい。

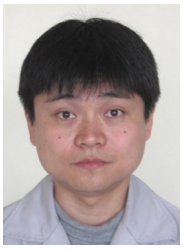
参考文献

(1) 一杉：処方薬と自動車運転―適切な処方と療養指導―，YAKUGAKU ZASSHI，Vol.137, No.3, pp.309-313（2017）
(2) 武原ほか：脳卒中・脳外傷者のための自動車運転，東京，三輪書店，2013，151p
(3) Inoue T et al. : Rate of Stroke Onset While Driving and Subsequent Collision, J Stroke Cerebrovasc. Dis., Vol.27, Issue9, pp.2553-2554（2018）
(4) Benjamin T et al. : Yarbus, eye movements, and vision, i-Perception, Vol. 1, pp.7-27（2010）
(5) Anne T et al. : A feature-integration theory of attention, Cognitive Psychology, Vol.12, Issue 1, pp.97-136（1980）
(6) Laurent I et al. : A Model of Saliency-Based Visual Attention for Rapid Scene Analysis, IEEE Transactions of Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 20, No.11, pp.1254-1259（1998）
(7) 岩瀬ほか：視線挙動の変容に基づく体調異常推定方法の検討，自動車技術会論文集，51 巻，6 号，pp.1006-1011（2020）
(8) 兎ほか：人工ポテンシャル法による周辺車両との関係性を考慮した車線変更推定，自動車技術会 2016 年春季大会学術講演会講演予稿集，pp.1397-1402（2016）
(9) 景山ほか：高度運転支援システムに向けたドライバモデル構築に関する研究 第 3 報 ドライバの運転特性評価，公益社団法人自動車技術会 2016 年秋季大会学術講演会公演予稿集，pp.1825-1828（2016）

（10）西郷ほか：先行車追従時のドライバモデルに基づく個別適合型運転状態診断手法に関する考察，日本機械学会論文集，Vol.80，No.815，p.TL0216（2014）
（11）桑原ほか：視野障害に起因する運転操作変容の検知方法の検討，自動車技術会論文集，52 巻，2 号，pp.349-354（2021）
（12）Nakashima R et al. : Egocentric Direction and Position Perceptions are Dissociable Based on Only Static Lane Edge Information, Frontiers in Psychology, Vol.6, 1837（2015）.

■著　者■

桑原 潤一郎


岩瀬 耕二

岩下 洋平

山本 康典

一杉 正仁

論文・解説

18

走行環境の特徴を利用した危険予測技術

Risk Prediction Technology using the Context of the Driving Environment

菅野　崇 *1　黒田　康秀 *2　伏間　丈悟 *3
Takashi Sugano　Yasuhide Kuroda　Takesato Fushima
山本　康典 *4　齊藤　裕一 *5
Yasunori Yamamoto　Yuichi Saito

要　約

本稿では，Mazda Co-Pilot Concept の実現に向けた潜在的危険の予測技術として，他車の車線変更予測と歩行者，自転車の飛び出し予測について説明する。従来の車線変更予測では，予測対象とする他車の予備動作や周辺車両との車間距離から，車線変更を予測してきた。本研究では，予測対象が車線変更を決断する車間ギャップのモデルを応用することで，実際に車線変更を行う 2.0 秒前の予測が可能となり，他車の横方向からの衝突を回避可能とする目途が付いた。また，飛び出し予測では環境の危険度を予測する先行研究があるが，飛び出す対象が分かっている必要があった。そこで本研究では，飛び出すのが歩行者か自転車かを一方通行やビルの壁，歩道の有無などの環境特徴から予測する技術に取り組んだ。今回，統計的に説明できるようモデル化の検討を進めることで，環境特徴が歩行者，自転車の行動に影響を与えることが明らかになった。

Abstract

We have worked on developing the technology to predict potential risks, aiming for realizing Mazda Co-Pilot Concept. In this paper, we describe the prediction of lane changes and run-out of pedestrians or cyclists. In the prediction of lane change, we applied a model of the gap between vehicles where a prediction target decides to change lanes. By adjusting the parameters to the prediction target while driving, we achieved a prediction time faster than the target of 2.0 seconds. In the prediction of run-out, it is required to identify what the target is, according to the previous research to predict risks on environment. In order to make effective use of the research, we worked on a technique to predict whether the target of run-out is a pedestrian or a bicycle based on environmental features. By developing a model that can explain the prediction statistically with factual data, it became clear that environmental features influence the behavior of pedestrians and cyclists.

Key words : ADAS, Driving environment recognition, Co-Pilot

1. はじめに

Mazda Co-Pilot Concept では，万一，ドライバーが運転不能になった場合に，システムが車両をコントロールし，安全な場所へ停車する仕組みを提供することで，お客様に安全・安心なカーライフを提供する。Fig. 1 に Mazda Co-Pilot Concept での走行例を示す。心疾患などの要因による運転不能状態はいつでも発生しうることから，お客様がクルマを利用する高速道路から一般道での作動が必要となる。

走行環境の危険は，Fig. 2 に示すように顕在的危険と潜在的危険とに分類・整理できる[(1)]。顕在的危険は衝突対象が明確であり，衝突被害軽減ブレーキや車間距離制御装置などの制御技術により除去されつつある。一方で潜在的危険は，衝突する対象が事前に見えない死角的危険と，隣接車線の他車など危険要因は見えるが衝突するか明確でない間接的危険があり，その対処はドライバーに任せられているのが現状である。これまで取り組んで

*1,3,4　統合制御システム開発本部
Integrated Control System Devel. Div.
*2　技術研究所
Technical Research Center
*5　筑波大学
University of Tsukuba

きた，間接的危険と死角的危険を予測する技術について報告する。

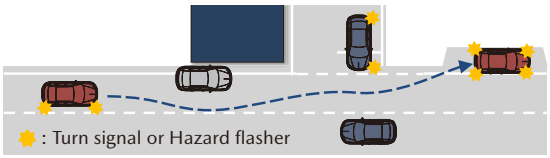


Fig. 1　Driving Example of Co-Pilot Concept (Local Roads)

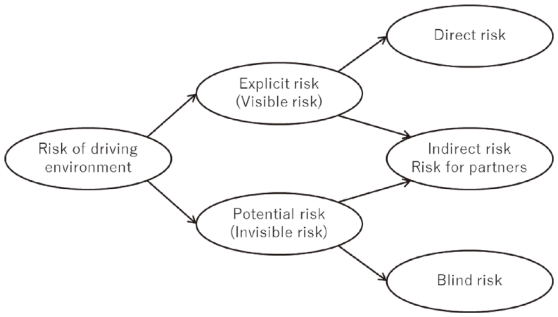


Fig. 2　Risks of Driving Environment

2. 取り組みの考え方

潜在的危険は不連続な走行環境の変化として現れる。そのため，その予測は運動方程式などの確定論的な手法ではなく，確率論的な手法を活用することになる。ビッグデータを利用しデータ駆動でモデル化していく技術が進歩してきているが，説明可能な状態でアルゴリズムの適用範囲を拡張していくため，全てをデータ駆動で構築するのではなく，人の行動を考えてモデル化し，その中に確率論的な振る舞いを織り込むことで性能を向上させた。

本稿では，これまでの検討事例として「他車の車線変更予測（間接的危険）」「飛び出し予測（死角的危険）」を説明する。

3. 他車の車線変更予測（間接的危険）

3.1　車線変更予測の課題

ドライバーが車を運転する際，周辺他車の行動を予測し，自車の行動を決定する。それをシステムが自動的に行う場合，前後方向については，レーダー等を用いて先行車との車間距離や相対車速をセンシングし，安全マージンを確保する行動決定が可能であり，車間距離制御装置（ACC）や衝突被害軽減ブレーキ（AEB）が商品化されている。一方，ジャンクションでの合流など他車の横方向の動きが生じる場面においては，あらかじめ車間距離を開けることや車線変更といった行動決定が必要となるが，車線間の他車の動きで対処しなければならず安全マージンが小さいのが問題である。

米国連邦運輸省の機関の 1 つである連邦道路管理局（Federal Highway Administration）が公開しているカメラから測定された交通データ[(2)] を用いて車両の動きを分析すると，平均的に車線を跨ぐ 1 秒程度手前まで，明確な横運動は発生しない。よって，目標達成には，車線変更の動きが出る前に関係する環境特徴を抽出し，予測に活用して精度を上げることが課題となる。

3.2　課題解決のアプローチ

車線変更の判断を事前に予測手法として人の行動メカニズムに則した Endsley の状況認知モデル[(3)] を参考に Fig. 3 に示す Step で開発を進めた。

Step 1：他車の車線変更そのものの動きではなく，それに備える予備動作の特徴量化（図中①）
Step 2：予測対象の状況認知をモデル化。他車を取り巻く相対位置や速度などの環境から予測（図中②）
Step 3：予測対象の内面・個人属性を判断予測に反映。横運動以外の行動から特性を予測（図中③）

Step 1 と Step 2 は予測対象の車線変更の際の振る舞いや周辺車両との相対運動を利用して予測する技術として報告している[(4)(5)]。本報告では Step 3 について説明する。

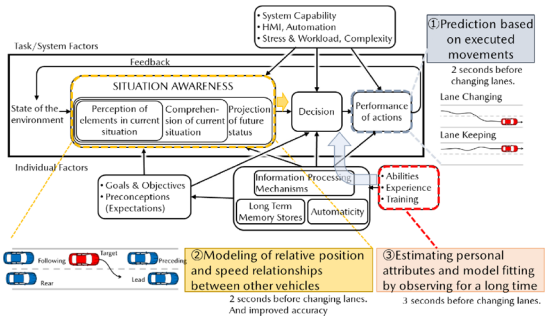


Fig. 3　Development Procedure of Lane Change Prediction

3.3　車線変更の行動分析と運転様式判別機能の構築

隣接車線の他車と他車との間に割り込む判断は，個人により異なる。この個人差を予測モデルに織り込むため Toledo らの先行研究[(6)] である Gap Acceptance Decision model（GAD）(Fig. 4）を参考とした。このモデルでは，予測対象が割り込み可能と判断する車間距離（Critical Gap）をパラメーターとしてもつ。この Critical Gap を個々の危険許容度に合わせることで，精度及び先読み時間の向上が期待できる。

ここで Critical Gap をどう事前に設定するかが問題となる。この問題についてドライバーの操作特性には運転行動全般で共通な因子があると考え，車線変更前の加減速行動や車間距離により層別できると仮説を立てて車線変更予測に運転様式判別機能（Driving Style Estimation: DSE）を追加した。

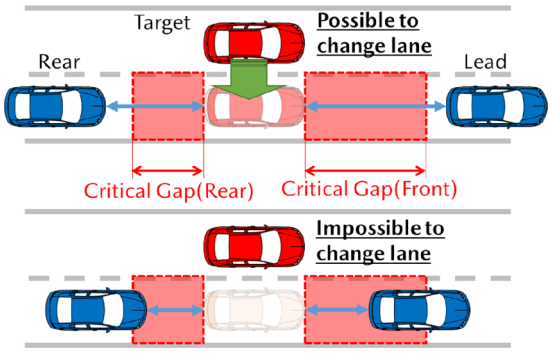


Fig. 4　Gap Acceptance Decision Model

（1）車線変更予測の構成

車線変更予測の構成を Fig. 5 に示す。図の左側が Step 2 までで取り組んできたものであり，予測対象の横方向の予備動作や周辺他車との位置関係を利用するアルゴリズムである。右側が運転様式判別機能であり，予測対象の「穏やか」「積極的」などの特性を予測して Critical Gap のパラメーターを修正し，GAD にて車線変更可否を判断する。車線変更予測全体としては，左右の処理を組み合わせ，確率的に車線変更の判断を推定する。

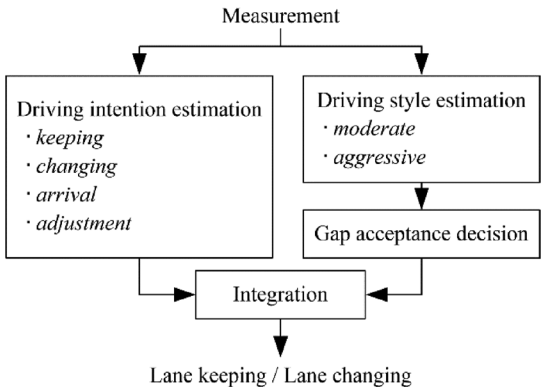


Fig. 5　Constitution of Prediction Model

（2）運転様式判別機能（DSE）の開発

ドライバーの運転様式の分類に追従走行における加減速行動の有効性を検討するため，ドライビングシミュレータ（DS）を用いて Fig. 6 に示すシーンを設定し被験者実験を行った。被験者が操作する車両を Target，先行車を Preceding，隣車線における先行車を Lead と定義した。これ以降，各車両を頭文字（T, P, L）で表記する。

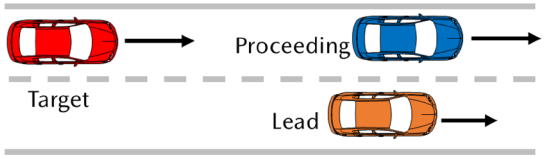


Fig. 6　Scenario of Subject Experiment

P と L には，車速 50km/h を基準としてランダムに ± 5km/h で変動させ，被験者は前方をふさがれた状態での追従走行を行い，追い抜けるようなら追い抜くという指示（タスク）が与えられた。また全ての被験者には，自身の意識を「慎重（careful）」，「積極的（aggressive）」のいずれかで運転して頂くこととした。

なお，本研究で行った全ての被験者実験は，試験開始前にインフォームドコンセントを得て行っている。

運転様式判別にあたり，追従走行では先行車との距離や相対速度に応じて衝突危険を感じつつ，それを許容できる距離を確保しているという考え方から斥力ポテンシャルモデルを考慮した Driving Risk Factor（DRF）を用いた。これまで障害物に対しする距離の自然対数を使ったモデル[4] が提案されているが，本研究では速度変動を反映できるよう改良し式(1)とした。

$$U_i = \frac{\exp\left[\varepsilon(\Delta v_i)\cos\theta_i\right]}{2\pi I_0\left[\varepsilon(\Delta v_i)\right]}\alpha\frac{\exp\left[-\dfrac{r_i^2}{2\sigma_i^2}\right]}{2\pi\sigma_i^2} \quad (1)$$

ここで，r_i は推定対象車との車間距離（m），σ_i は車間距離の分散量（m^2），Δv_i は推定対象車との相対速度（m/s），θ_i は相対角度（rad），αは係数である。また ε は Δv_i により定まるパラメーターであり，ポテンシャルが高まる方向を決定する機能をもつ。添え字 i は，車両を示す番号であり，Fig. 6 の場合は P と L の 2 台なので，1 もしくは 2 となる。

被験者実験の結果例を Fig. 7 に示す。図中 D_x は車間距離，$V_{r,x}$ は相対速度，U は DRF を表し，それぞれの平均的な値で正規化した値で示す。慎重な走行と積極的な走行とを比較すると，3 つの特徴量のそれぞれで違いがあるが，DRF の変動には，大きな違いが生じることが見て取れるため，DSE では分類器として Support Vector Machine（SVM）を用い，ドライバーの運転様式を判別するようにした。この際の入力候補として，車間距離（Distance），相対速度（Rel. velocity）に加え，①車間距離変動をゲイン，減衰比で特徴化したもの②1/TTC，③KdB（接近離間状態評価指標）と④提案手法である DRF を比較した結果を Table 1 に示す。提案手法は 69.0%の推定精度であり他のものよりも良い性能であることが確認できる。

Table 1　Comparison of Behavior Estimation Models

Feature vector	Estimation accuracy（%）
①(gain parameter, damping ratio)	41.5
②(Distance, Rel. velocity, 1/TTC)	63.8
③(Distance, Rel. velocity, KdB)	65.1
④(Distance, Rel. velocity, DRF)	69.0

3.4　車線変更予測の性能評価

前述のとおり，提案手法は T の走行から運転様式を予測し，GAD の Critical Gap に反映させる。DSE は「慎重」と「積極的」の境界面からの距離υに基づいて，そのク

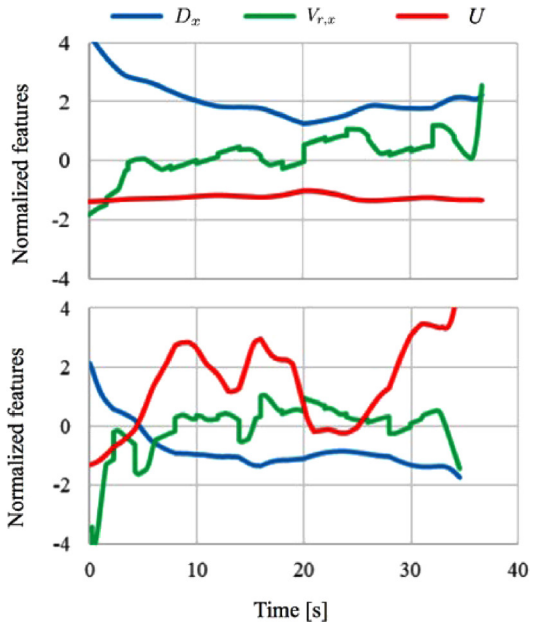


Fig. 7　Example of Driving Result
(upper: careful, lower: aggressive)

ラスに属する確率の連続値として出力する。Critical Gap の前方側を G_l，後方側を G_r として，下記の式に基づき設定した。

$$G_l = \exp\left(\gamma_l + \alpha_l \Delta V_l(t)\,\mathrm{sgn}\left(\Delta V_l(t)\right) + \beta_l v(t)\right) \quad (2)$$

$$G_r = \exp\left(\gamma_r + \alpha_r \max\left(0, \Delta V_r(t)\right) + \beta_r v(t)\right) \quad (3)$$

ここで，α_l，β_l，γ_l，α_r，β_r，γ_r は係数である。また ΔV_l，ΔV_r は Fig. 4 での時刻 t における Target と Lead 及び Rear との相対速度を表し，sgn(・)は符号関数である。

評価にあたり使用したデータ[2] は San Francisco Bay 地域における I-80 番道路のもので，289 台の車線変更データを用いて推定モデルの学習を行い，285 台のデータにより性能評価を行った。評価指標として予測精度は Table 2 の F_1 値を用いる。予測先出時間 τ_d は，車線変更すると推定された時刻 τ_j，ターゲット車が中央線を越える時刻を τ_c から次式とした。

$$\tau_d = \tau_c - \tau_j \quad (4)$$

予測先出時間が大きい値をもつほど優れた早期認識性能をもつことを表し，単位は秒となる。上記の指標を用いて車線変更推定の成敗基準を以下に設定した。

・Success：一定時間内に推定された場合
　　($0 < \tau_d < 5.0$)
・Failure：推定時刻が車線変更時刻より遅い
　　($\tau_d \leqq 0$)
・False alarm：推定時刻が早すぎる場合（$\tau_d \geqq 5.0$）

結果を Table 2 に示す。Step 1＋2＋3 の予測先出時間は，車線変更による衝突を通常域の減速（0.24G 程度）で回避できることを意味する。

Table 2　Comparison of Intention Estimation Models

	Step1＋2	Step1＋2＋3
Predictive Accuracy (F_1 score)	97.1%	97.1%
Foresight time	1.92s	2.07s

4. 飛び出し予測（死角的危険）

4.1　飛び出し予測の課題

飛び出す対象は「歩行者」,「自転車」,「オートバイ」,「自動車」,「その他」があるが，法律による制約が少なく，自由に移動する「歩行者」と「自転車」はルールベースでの予測が難しいと考えられ，これらを対象とした予測技術に取り組む。

先行研究では，衝突回避のため急減速までの余裕時間（Safety Cushion Time: SCT）を指標にした研究[7][8] があるが，飛び出す対象を「歩行者」か「自転車」のどちらかに固定した条件で SCT を予測している。しかし，実際には事前に飛び出す対象は分からないことが問題である。

一般的に Fig. 8 に示すような道路環境の因子のなかには，路面の段差や縁石，道路の幅，優先・非優先など自転車の行動に影響を与えるが，歩行者にはあまり影響しないものがある。そこで，「飛び出し事象が生じるときは，道路環境の因子から説明することが可能である。」という仮説を立案した。この作業仮説を検証し，飛び出す対象に影響を与える因子を明確にすることが課題である。

Fig. 8　Context Example
(priority/non-priority, road width, etc.)

4.2　課題解決のアプローチ

東京農工大学スマートモビリティ研究拠点が運営しているヒヤリハットデータベース（HHDB）を用いて，対歩行者また対自転車のニアミス事象を抽出し，そのデータに対して，道路環境の因子にアノテーションを付す。この因子と飛び出してきた対象と結びつける回帰モデルを用いて仮説検証する。

4.3　飛び出し対象のデータ分析による環境因子の抽出

データ抽出に際して，例えば，バスなどの駐車車両の陰から飛び出してくるのは歩行者であることが多い。そこで，死角を作っている要因について分類を行うとTable 3のようになった。結果から歩行者は建物の影から飛び出すケースがやや多いが，自転車は建物の影が圧倒的に多いことがわかる。このように明らかな傾向がみられることから，これらの因子を採用し先行研究[7][8]に用いられている特徴量に死角要因を加え，扱う環境因子をTable 4とした。

Table 3　Number of Data Related to Blind Spot

Blind factor	Pedestrian	Cyclist
Building wall	267	459
Parked vehicle	150	63
Stopped vehicle	190	105
Moving vehicle	138	54
Total	745	681

Table 4　Context Property Based on Annotations

Type	Definition
Lateral gap	Lateral distance to blind object（m）
Area	Residential, Urban & Business, Rural, Other
Road	One way, Both way, Other
Side	None, Line, Step, Guardrail
Intersection	2〜3 forked road, 4〜5 forked road, 6〜 forked road, Straight
Width	1〜3 lanes, 4〜 lanes, Other
Crosswalk	Without，With
Parked vehicle density	0, Low（1〜2）, Middle（3〜5）, High（6〜）
Pedestrian density	Low（0〜2）, Middle（3〜9）, High（10〜）
Traffic density	Low（0〜2）, Middle（3〜9）, High（10〜）
Leading vehicle	Without, With
Parked vehicle type	Passenger vehicle, Track, Bus
Time	6:00〜10:00, 10:00〜16:00, 16:00〜20:00, 20:00〜6:00
Weather	Sunny, Rain
Blind spot	Building wall, Parked vehicle, Stopped vehicle, Moving vehicle
Age	Unknown, Elderly, Mature, Young, Child

4.4　判別式の構築と性能評価

（1）判別式と評価方法

ここで行う判別は特定事象の発生率の予測であるため，ロジスティック回帰分析を用いた。目的変数は，飛び出し対象（1：自転車，0：歩行者）であり，説明変数は主に道路環境の因子である。判別式を式(5)に示す。

$$y=\frac{1}{1+\exp\left[-\left(\alpha_1 x_{11}+\alpha_2 x_{12}+\ldots+\alpha_i x_{ji}+b_j\right)\right]} \quad (5)$$

ただし，x_{ji}は因子であり，Talbe 4の該当因子ごとに，1 or 0を設定するものである。ただし，横位置のみは定量値として設定する。

評価はステップワイズ法を用いて，説明変数を選択した上でオッズ比（OR）を用いて行った。オッズとはpを確率とするとき，p/p−1として表される。分割表の例をTable 5に示す。

Table 5　Example of Contingency Table （crosswalk）

	Cyclist	Pedestrian	Total
With crosswalk	A	B	A＋B
Without crosswalk	C	D	C＋D
Total	A＋C	B＋C	A＋B＋C＋D

因子の中に横断歩道があった場合，pを自転車が飛び出してくる割合とおくと，1−pは歩行者の割合を意味する。このことから，p＝A/(A＋B)，1−p＝B/(A＋B)である。横断歩道ありの因子におけるオッズは下記で示される。

$$\frac{p}{1-p}=\frac{A/(A+B)}{B/(A+B)}=\frac{A}{B}$$

同様に，横断歩道なしの因子におけるオッズは下記となる。

$$\frac{p}{1-p}=\frac{C/(C+D)}{D/(C+D)}=\frac{C}{D}$$

オッズ比はこれらの比を表現することから式（6）となる。

$$OR=\frac{A/B}{C/D}=\frac{AD}{BC} \quad (6)$$

オッズ比＝1の場合，その因子は目的変数に影響を与えないことを意味する。また，オッズ比＞1の場合は目的変数に対して正の影響，オッズ比＜1の場合は目的変数に対して負の影響があることになる。

（2）性能評価

HHDBから，歩行者と自転車それぞれ550件のデータを用いてモデルを学習させ，195件の歩行者，131件の自転車データを用いて評価した。回帰分析の結果をTable

6 に示す。オッズ比は確率の比であることから 95%信頼区間が存在し，Table 6 ではその上下限を示す。この区間に 1 を含まなければ，その因子は有意であると見なせ，その因子のみを残した。因子「都市＆ビジネス」「一方通行」「交通密度 低」「交通密度 中」は，目的変数に負の影響を与えることから歩行者である と判断する方向へ作用し，それ以外は，自転車である方向へ作用することが統計的に説明できる。

Table 6　Logistic Regression Analysis

Factor	Lower OR	Upper OR
Urban & Business	0.50	**0.98**
One way	0.36	**0.88**
Sidewalk: Step	**1.18**	2.21
1〜3 lanes	**1.23**	2.27
Traffic density: Low	0.22	**0.87**
Traffic density: Middle	0.21	**0.78**
Without leading vehicle	**1.08**	2.24
Time: 10:00-16:00	**1.07**	2.34
Time: 16:00-20:00	**1.51**	3.47
Parked vehicle type: Passenger vehicle	**1.01**	3.31
Building wall	**1.51**	3.52
Stopped vehicle	**1.06**	2.88
Lateral gap	**1.19**	1.53

分析結果について解釈すると，都市部は歩行者の数が多い場所であり一方通行が多く車両が少ないことから，より自由に行動する場所であることなど印象と一致している。自転車と識別する要因については，建物・壁が死角の要因になるときに，飛び出すのが自転車である確率は Table 3 より 63%となり歩行者よりも確率が高くなるが，オッズ比も同方向へ作用している。また時間帯については，自転車は業務でも使うことから，日中〜夕方にかけて飛び出しが増えるのであろう。対面で走行してくる自転車について，避けやすい乗用車の場合は減速せず飛び出すが，大型車では横移動が大きく慎重になると考えられ，主観と一致する。

この特徴量を使った飛び出し対象の予測性能を Table 7 に示す。この結果から正解率は 76%となる。この性能は，飛び出し発生時の急減速の頻度を 12%改善することに相当する。以上の結果から，道路環境の因子から説明することが可能であることが検証され，飛び出す対象に影響を与える因子を明確にすることができた。

Table 7　Prediction Results from Classification Model

		Prediction	
		Pedestrian	Cyclist
Actual	Pedestrian	147	48
	Cyclist	29	102

5. おわりに

他車の車線変更予測と飛び出し予測について取り組んだ。車線変更予測では，車線内走行における加減速，車間距離の行動モデルを構築し，そのモデルを用いて他車の運転様式を判別することで予測性能を向上させた。飛び出し予測では，環境特徴から飛び出してくるのが歩行者か自転車かを判別する機能を開発し，予測性能の向上の目途が立った。

いずれの取り組みも，予測器の構成を意味のある機能に分解し，必要に応じて統計的な手法でモデル化することで，どのような機能・性能を有しているかを分かりやすく示すことができる。今後も機能・性能の向上を計画的に進めていく。

参考文献

(1) 蓮花一己：交通危険学，啓正社

(2) M. R. Endsley: Measurement of Situation Awareness in Dynamic Systems, Human Factors, Vol.37, No.1, pp.65-84 (1995)

(3) The Federal Highway Administration: Next Generation Simulation, http://ops.fhwa.dot.gov/trafficanalysistools/ngsim.htm (accessed: 10 May 2015)

(4) Hanwool Woo et al.: Dynamic Potential-Model-Based Feature for Lane Change Prediction, 2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), (2016)

(5) Hanwool Woo et al.: Lane Change Detection in Other Vehicles Based on Vehicle Trajectory Prediction,: IEEE Robotics and Automation Letters, Vol.2, No.2, pp.1109-1116 (2017)

(6) T. Toledo et al.: Modeling duration of lane changes, Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, Vol.1999, pp.71-78 (2007)

(7) ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク：リスクポテンシャル予測による自動車の障害物回避運動制御，計測と制御，Vol.54, No.11, pp.820-823 (2015)

(8) 齊藤裕一，井上秀雄，ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク，セイフティクッション：走行環境文脈と運転行動状態に基づく危険度推定モデルの構築（第一報）―死角での対歩行者ヒヤリハットの形成過程に対する考察―，2018 年度自動車技術会春季大会学術講演会予稿集，文献番号 20185429（2018）

■著　者■

菅野 崇

黒田 康秀

伏間 丈悟

山本 康典

齊藤 裕一

論文・解説

19

被水シミュレーションを用いた実車被水量の予測技術

Prediction of Amount of Water Received for Vehicle by Using Splash Simulation

丸山　慧 *1　土屋　明宏 *2　吉田　敏弘 *3
Satoshi Maruyama　Akihiro Tsuchiya　Toshihiro Yoshida
山根　貴和 *4　上岡　孝志 *5　落岩　克哉 *6
Takakazu Yamane　Takashi Kamioka　Katsuya Ochiiwa

要　約

自動車の防錆品質の適正化のためには，部品ごとの腐食環境を定量化し，それぞれの環境に応じた防錆処理を施す必要がある。しかしながら，車両の構成部品は何万点にも及ぶことから，実車での腐食環境計測には膨大な時間，コストを要する。そこで，防錆開発の効率化のために部品ごとの腐食環境を予測する上で最も重要な因子である走行中の部品ごとの被水量に着目し，被水シミュレーションの開発に取り組んだ。流体解析手法として Moving Particle Simulation（MPS）法を活用することでタイヤからの水跳ね挙動を再現し，更に車両周りの気流速度データとの連成解析を行うことで，極めて高精度な被水量の予測技術を確立した。

Abstract

In order to optimize the quality of anti-corrosion for vehicle, it is necessary to quantify corrosion environment of each component and provide appropriate treatment according to the environment. However, it takes much time and cost to measure corrosion environment on vehicle because a vehicle is composed of tens of thousands of parts. For the efficient development of anti-corrosion performance, we have worked on developing the splash simulation, focusing on the amount of water received on the vehicle while running, which is the most important factor to predict the corrosion environment for each component and developed the splash simulation. We have replicated splash behavior from own tire by utilizing the Moving Particle Simulation (MPS) as the CFD (Computational Fluid Dynamics) method. Furthermore, we have developed the highly accurate prediction of the amount of water received by conducting a water-airflow velocity coupled analysis around the vehicle.

Key words : Rust prevention, Reliability, CFD

1. はじめに

腐食とは金属と水の電気化学反応であり，金属表面に形成する水膜の性質とその持続時間の影響を強く受ける。自動車の腐食を促進する因子としては，車体に付着した塩が挙げられる。塩の付着量が多いほど，水膜中の電気伝導度が増加し，その吸湿作用により水膜の持続時間が長時間化する。従って，東南アジアに代表される飛来海塩が多い地域と，欧米の寒冷地に代表される冬季に凍結防止塩を散布する地域では腐食起因の車両故障が問題となる[(1)]。このような問題を起こさないためには，地域ごとの腐食環境を定量化し，適切な防錆処理を設定する必要がある。そこで，走行中の自動車各部位の腐食環境を定量的に測定可能な腐食環境計測システムを構築し[(2) (3)]，本システムにより得られた計測データと走行地域の気象データを関連付けて，大規模データを解析する技術を開発した。その結果，気象データを元に海塩地域における腐食環境が予測可能となった[(4)]。更に，本手法を発展させることで，凍結防止塩散布地域における気象データを元に腐食環境を予測する技術を開発した[(5) (6)]。これらの成果により，気象データを元に地域ごとの腐食環境については，おおむね予測が可能となった。一方で，車両の部品ごとの腐食環境を定量化するためには，現状何万点にも及ぶ車両の構成部品の腐食環境を計測する他なく，そのためには膨大な時間，コストを要する。そこでマツダは，部品ごとの腐食環境を予測する上で最も重要な因子である走行中における被水量の予測技術を確立した。本稿では，凍結防止塩散布地域を対象として，新規に開発した被水シミュレーションを用いた被水量の予測結果と実車試験結果との比較を行い，その精度を検証した結果について報告する。

*1〜5　車両実研部
Vehicle Testing & Research Dept.
*6　市場品質部
Field Quality Dept.

2. 凍結防止塩散布地域の被水予測技術

2.1　凍結防止塩散布地域における被水シーン

凍結防止塩散布地域においては，凍結防止塩により凝固点が降下することで溶解した雪により水たまりが形成され，このような水たまり上を走行する際に塩水が車体へと付着する。従って，海風により塩が運ばれ，車体へ一様に塩が付着する飛来海塩地域と異なり，凍結防止塩散布地域においては，走行中の被水量が車両の腐食因子として極めて重要である。被水シミュレーションを構築するにあたっては，走行中の被水シーンを Fig. 1 のように分類した。図中(1)の自車のタイヤによる水跳ねにより，サスペンションを始めとした車両下回りの部品やドア，エンジンルーム内の比較的低い位置にレイアウトされた部品が被水する。また，図中(2)の前走車からの水跳ねにより，ドアやボンネット，ルーフといった車両外板の他，フロントグリルを通過しエンジンルーム内の車両前方側にレイアウトされた部品が被水する。新規に開発する被水シミュレーションにはこれら 2 つのシーンを再現可能であることが求められる。

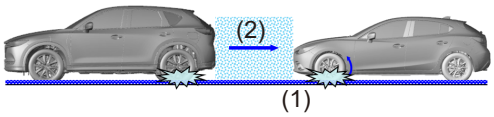


Fig. 1　Schematic Illustration of The Splash in The Region Where Anti-freezing Salt is Spread

2.2　被水シミュレーション技術の課題と対応

車両周りの流体解析を行う上では，解析空間を格子状に分割し計算点とする格子法を用いるのが一般的であり，これまでに多くの研究が報告されている[7][8]。しかしながら，今回対象としている自車のタイヤによる水跳ねや，前走車からの水跳ねの飛散を格子法で再現する際には，広大な解析空間を格子により微細に分割する必要があり，計算コストの増加が課題になる（Fig. 2(a)）。更には，流体をオイラー的に計算する格子法では水やオイルのような液体特有の分裂や凝集といった挙動を再現するのが困難である。そこで，流体を粒子の集まりとして表現する粒子法に着目した。粒子法を用いることにより，計算コストを小さくするだけでなく，車両周りにおける水の分裂や凝集といった現象の再現が期待される（Fig. 2(b)）。

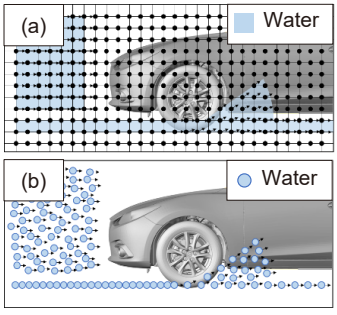


Fig. 2　Schematic Illustration of The Simulation Concepts (a) Grid Method (b) Particle Method

2.3　粒子法の概要

本研究では，粒子法の中でも Moving Particle Simulation (MPS) 法を用いたプロメテック・ソフトウェア(株)製の流体解析ソフトウェアである Particleworks を用いて解析を行った。MPS 法は，有限個の粒子により非圧縮流れの支配方程式を離散化する計算手法である。非圧縮性流れの支配方程式は連続の式(1)とナビエ・ストークス方程式(2)である[9]。

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} = -\frac{\nabla P}{\rho} = \nu\nabla^2\vec{u} + \vec{g} \tag{2}$$

ここで，ρ：密度，$\vec{u}$：速度，P：圧力，ν：動粘性係数，$\vec{g}$：重力加速度である。

3. 水跳ね挙動の可視化

3.1　実験方法

被水シミュレーションを開発する上で，実車の水跳ね挙動及び被水箇所の可視化に取り組んだ。

(1) タイヤによる水跳ね

実車の走行中，タイヤにより跳ね上げられた水の挙動を明らかにするために，水深 10mm に設定した試験路の上を走行し，水の飛散を車両前方及び後方から高速度カメラにより撮影した。このとき，水の飛散に及ぼす車速の影響について調べるために車速は 20，40，60km/h の 3 水準とした。

(2) 前走車からの水跳ね

前走車からの水跳ねによる被水を再現するために，風洞試験室において車速 100km/h 相当の風を与えながら，車両前方に設置したノズルから水を散布した。ここで，フロントグリルやラジエーターへの通過といったユニークな現象があるために，シミュレーション化が最も困難なエンジンルーム内の部品における被水箇所の面積率を指標としてシミュレーションを開発した。開発を行う上で，被水した際に赤く変色する被水検知薬をエンジンルーム内の部品へ塗布し，エンジンルーム内の被水箇所の可視化に取り組んだ。

3.2　実験結果

(1) タイヤによる水跳ね

車速 60km/h で走行した際のタイヤによる水跳ねを Fig. 3 に示す。水は車両の前方及び横方向へと飛散しているが，このとき，横方向へ飛散する水に注目すると，車両進行方向に対して正面視でおよそ 45°の角度で飛散していることが分かる。車速の増加に伴い，タイヤから跳ね上げられた水の最高到達高さは高くなるものの，その飛散角度はおよそ 45°で一定であった。

(2) 前走車からの水跳ね

車両前方から散布された水は，フロントグリルを通過してエンジンルーム内へと侵入し，エンジンカバーやオイルパンなど広い範囲で被水が認められた。侵入した水はそれぞれの部品へ付着した後，風の影響を受けて車両後方側へ流れていた。

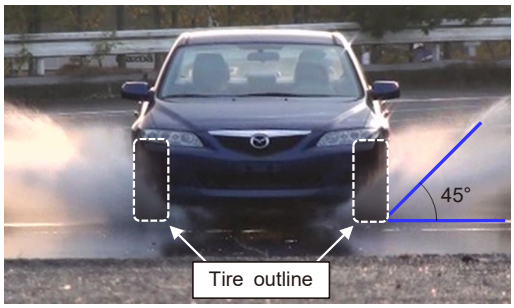


Fig. 3　Splash Behavior From Own Tire at 60km/h

4. 被水シミュレーションの開発

4.1　シミュレーション条件

（1）タイヤによる水跳ね

自車のタイヤによる水跳ねのシミュレーション化は，水たまりを模擬した試験路モデル上で車両モデルを走行させることで行った。試験路モデルは路面モデルと水たまりから構成されており，幅 2.6m の路面モデル上に水深 10mm の水たまりを設定した。このとき，水たまりは粒子径が 2mm の粒子に対して密度や動粘性係数といった水の物性を付与し，路面モデルとの境界条件を与えることで作成した。車両モデルについては 20，40，60km/h の車速に応じた車両前方への進行速度を与え，車両モデルのうちタイヤとホイールに対しては，車速 20，40，60km/h 相当の回転速度を与えることで，水粒子にタイヤから圧力を与え，タイヤによる水跳ねを模擬した（Fig. 4）。

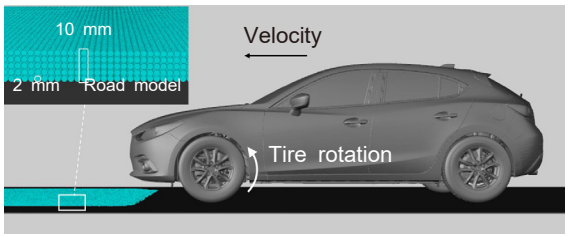


Fig. 4　Simulation Condition for Splash from Own Tire

（2）前走車からの水跳ね

前走車からの水跳ねのシミュレーション化は，ノズルに相当する水の流入口を設け，車両前方から粒子を飛散させることで行った（Fig. 5）。粒子径は 2mm とし，密度や動粘性係数といった水の物性を付与した上で，飛散する速度や量といった試験条件は実車試験に揃えた。このとき，水の飛散に対する車両周りの風流れの影響を評価するために，気流速度有無の Case1 と Case2 の 2 つの条件で解析を行った（Table 1）。このとき，Case2 では，粒子に対して空気抵抗力を作用させるために，外部の流体解析ソフトを用いて取得した車速 100km/h 相当の車両周りの気流速度データをインポートした。更に，インポートした気流に対して粒子が追従するよう，抗力係数のパラメーター設定を行った。一方で，Case1 では上記の気流速度データのインポート及びパラメーター設定は行わずに解析を行った。

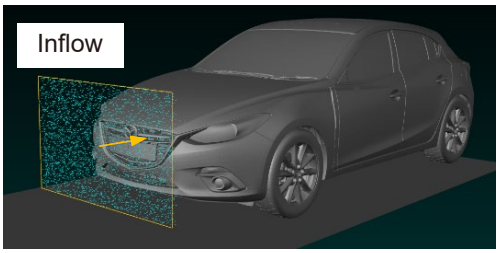


Fig. 5　Simulation Condition for Splash from Vehicle Ahead

Table 1　Simulation Conditions about The Two Cases for Splash from Vehicle Ahead

Property	Case1	Case2
Airflow Velocity	None	Imported from Other CFD
Parameter Setting	None	Provides Drag Coefficient

4.2　シミュレーション結果

（1）タイヤによる水跳ね

車両後方からとらえた自車のタイヤによる水跳ねのシミュレーション結果と実車試験の結果を比較して Fig. 6 に示す。車速の増加に伴いタイヤからの水跳ねの最高到達高さは高くなる一方で，その飛散角度はおよそ 45°で一様であり，実車試験における水跳ねの挙動をよく再現できている。

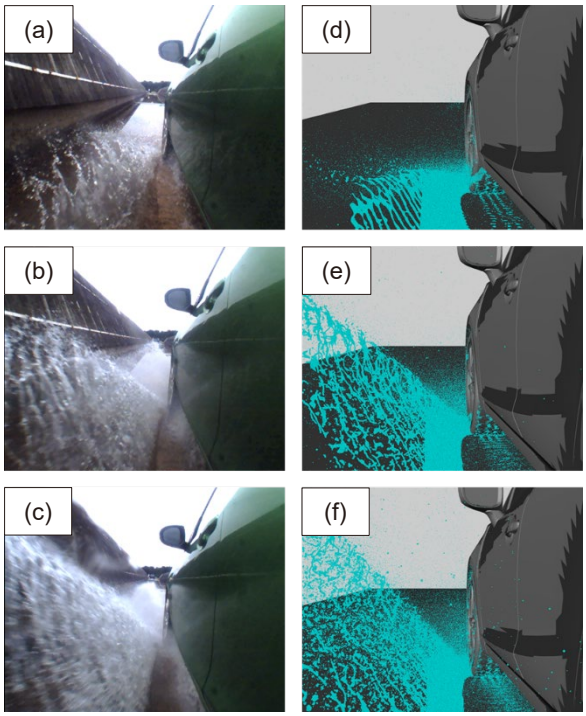


Fig. 6　Comparison of Splash Behavior from Own Tire between Experiments (a, b, c) and Simulations (d, e, f) at 20km/h (a, d), 40km/h (b, e) and 60km/h (c, f)

（2）前走車からの水跳ね

前走車からの水跳ねのシミュレーション結果を Case2 においてインポートした気流速度データとともに，車両右半分の断面図で示す（Fig. 7）。フロントグリルから流入した風はエンジンカバー上方及びオイルパン下方を通り，車両後方まで流れていく（Fig. 7(a)）。このとき，気流速度データをインポートし，パラメーター設定を行った Case2 は，気流速度データをインポートしていない Case1 に対し，粒子がエンジンルーム内の車両後方まで飛散しており，インポートした気流に対して粒子が追従していることが分かる（Fig. 7(b,c)）。更に，エンジンルーム内に侵入した水粒子により被水した箇所を可視化するために，解析モデルに対する粒子の衝突箇所を元にマッピングを作成し，実車の被水箇所との比較を行った。図中の数字は被水箇所の面積率を表す（Fig. 8）。Case1 では，エンジンカバーやオイルパンの前端までしか被水が認められず，面積率も一致していないのに対し（Fig. 8 (c, d)），気流速度データをインポートした Case2 では，被水箇所がより後方まで拡大しており，面積率についても実車とよく一致している（Fig. 8(a, b, e, f)）。従って，被水シミュレーションの精度向上を図る上で，車両周りの気流速度データをインポートし，解析を行うことが有効であることが分かった。

4.3　シミュレーション結果に対しての考察

4.2.(1)項において，MPS 法を用いて開発した被水シミュレーションがタイヤからの水跳ね挙動をよく再現できていることを明らかにした。更に 4.2.(2)項において，車両周りの気流速度データをインポートすることで，前走車からの水跳ねが車両周りの気流に追従する様子を再現可能であることを明らかにした。これらの知見を踏まえ，自車のタイヤによる水跳ねと前走車からの水跳ねの両方を併せて予測できる被水シミュレーションを開発した。気流速度データを用いずに解析した結果（Fig. 9(b)）に対し，車両周りの気流速度データをインポートすることにより，自車のタイヤによる水跳ねと前走車からの水跳ねの両方が気流に対して追従しているのが認められる（Fig. 9(a, c)）。更に，実車走行後の被水箇所を被水検知薬により，被水シミュレーションにおける被水箇所は粒子の衝突情報を元にマッピングを作成することでそれぞれ可視化し，被水箇所の比較を行った。図中の数字は被水箇所の面積率を表しており，被水箇所及び面積率はよく一致していることが分かる（Fig. 10）。なお，当初懸念されていた計算コストについても，MPS 法という新規手法を用いることにより，解析の開始から完了までおよそ 10 時間と実用上問題のない解析時間に抑えることができた。

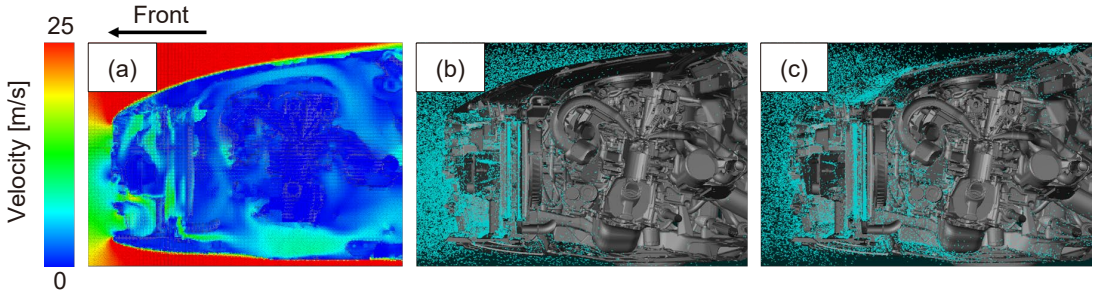


Fig. 7　Simulation Results of Splash from Vehicle Ahead, Showing The Cross Section of The Right Part of Vehicle
(a) Airflow Velocity Data Imported for Case2, (b) Case1 (without Airflow Velocity),
(c) Case2 (with Airflow Velocity)

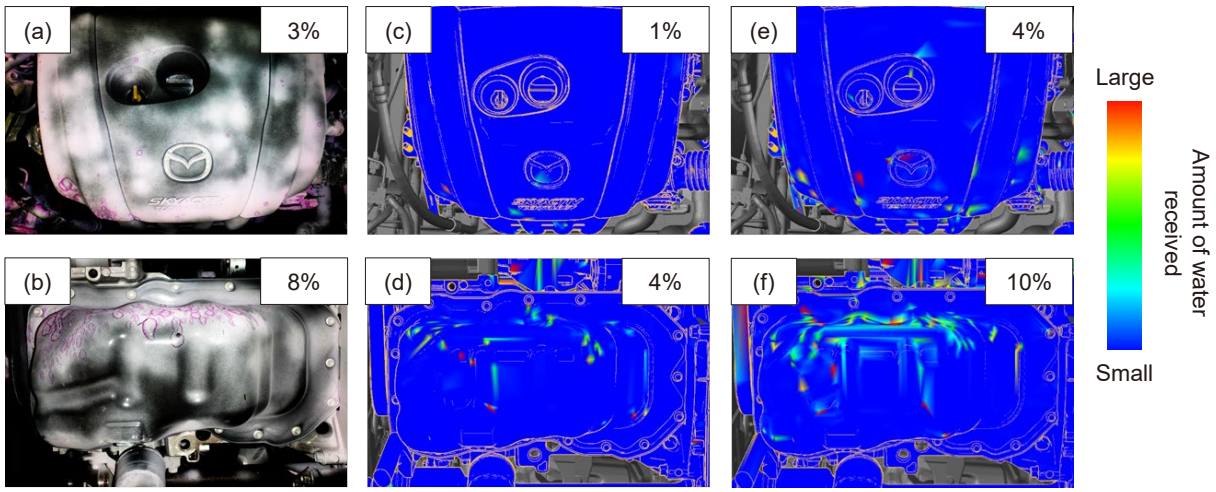


Fig. 8　Comparison of Areas Water Received between Experiments (a, b) and Simulations without Airflow Velocity Data (c, d), with Airflow Velocity Data (e, f) at Engine Cover (a, c, e) and Oil Pan (b, d, f)

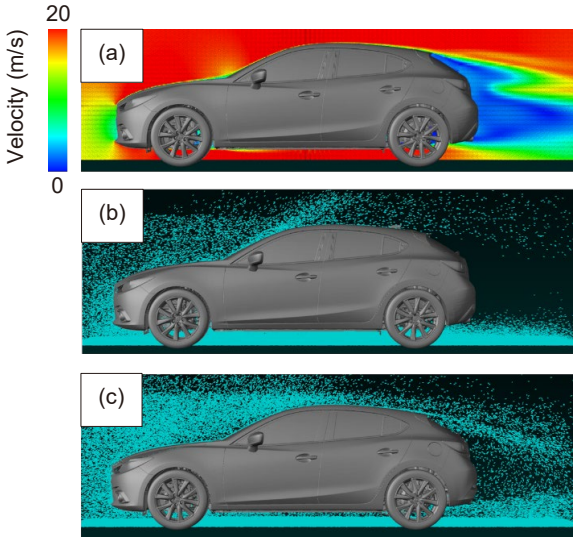


Fig. 9　Newly Developed Splash Simulation, Showing (a) Airflow Velocity Data Imported and Splash Behavior around The Vehicle (b) without Airflow Velocity and (c) with Airflow Velocity

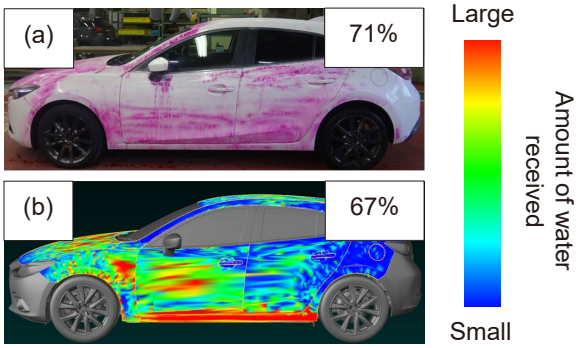


Fig. 10　Comparison of Areas Water Received between Experiments (a) and Simulation (b) at Body Side Components

5. 被水量予測結果の検証

5.1　実車被水量の定量化手法

開発した被水シミュレーションを用いて実車における被水量の予測技術を構築する。まず，シミュレーションの精度を検証する上で指標となる実車被水量の定量化手法について検討を行う。被水量の測定方法については，対象部品の近くにタンクを設置し，飛散してきた水を採取する方法や多孔質のシートで部品を覆い，浸透した水量を測定する方法などさまざまな報告[10]がされているが，本研究においては吸水性ポリマーシートを用いて測定を行った。被水量に対するポリマーシートの吸水量の評価をラボにて行ったところ，被水量が 2000g/m^2 以内であれば被水量に対しての吸水率はおよそ 80%であり，最大で 2400g/m^2 までの吸水が可能であるという知見が得られた（Fig. 11）。

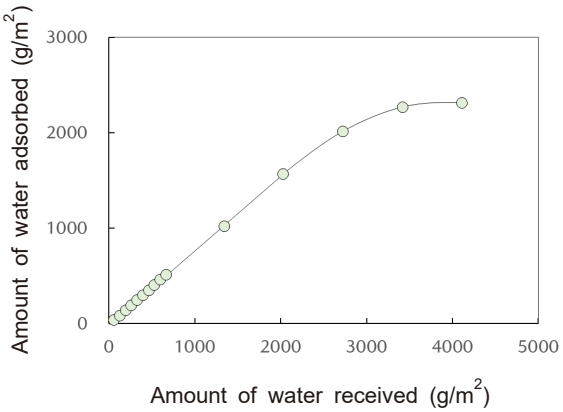


Fig. 11　Relationship between Amount of Water Absorbed and Amount of Water Received

5.2　被水シミュレーションを用いた被水量の予測

被水シミュレーションにおける被水量の予測は粒子の衝突回数を元に式(3)により求めた。

$$L = V \times \rho \times N \tag{3}$$

ここで，L：被水量，V：一粒子あたりの体積，ρ：密度，N：粒子衝突回数である。MPS 法の計算は粒子の体積一定で行っているため，粒子の衝突回数が多いほど被水量が多いという結果が得られる。

被水シミュレーションによる被水量の予測精度を検証するために，被水量が 2000g/m^2 以下となる実車の 5 箇所にポリマーシートを装着した状態で走行し，吸水量の測定を行った。得られた吸水量は，5.1 節で得られた知見を元に被水量へと換算した（Fig. 12(a)）。次に，被水シミュレーションにおいて実車でポリマーシートを装着した箇所と同様の部位にポリマーシートを模したモデルを挿入した後に解析を実施した（Fig. 12(b)）。解析終了後に挿入したモデルに対しての被水量を式(3)により求めたところ，得られた被水量は実車試験における計測値とよく一致した（Fig. 13）。

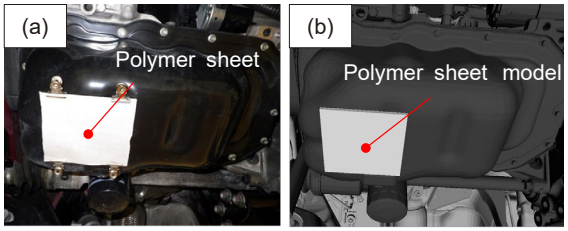


Fig. 12　Measurement Method Examples of Amount of Water Received by Using Polymer Sheets at Oil Pan (a) Experiments (b) Simulations

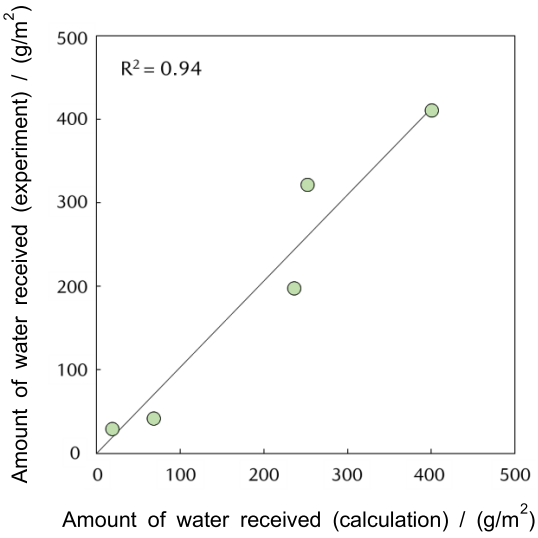


Fig. 13　Prediction Accuracy of Splash Simulation for Amount of Water Received

6. まとめ

車両部品の腐食環境予測を目的に，実車の被水状況を再現可能な被水シミュレーションを開発した。考案した被水量予測式により予測した被水量は実車の被水量とよく一致している。更に，本シミュレーション技術により予測した被水量から部品ごとの腐食環境を予測する技術を確立し，既に量産開発へ部分的に実用化している。

今後，本技術により得られた被水量と，腐食環境計測システムにより得られた測定値，気象データを組み合わせることで，部品あるいは市場ごとの腐食環境に応じた防錆仕様の適正化を可能とする。

参考文献

（1）田村優：自動車の錆と信頼性（故障物理と信頼性），日本信頼性学会誌，26 巻，1 号，pp.9-14（2004）

（2）福田克弘ほか：車両の腐食環境計測システムの開発，自動車技術会 2015 年春季大会学術講演会予稿集（2015），20155384　No.85-15S，pp.2023-2026

（3）福田克弘ほか：新計測システムを用いた車両腐食環境の定量化と解析，材料と環境 2018 講演集，B-106，pp.113-114（2018）

（4）中本尊元ほか：大規模データのクラスタリング分析による腐食要因推定技術の開発，第 65 回材料と環境討論会講演集，D-118，pp.351-352（2018）

（5）喜久山良弐ほか：大規模データを用いた凍結防止塩散布地域の腐食環境分析，自動車技術会 2019 年秋季大会学術講演会予稿集（2019），20196108

（6）山根貴和ほか：車両腐食環境の定量化技術と分析手法の開発，自動車技術，Vol.74，No.7，pp.90-95（2020）

（7）Prashant Khapane et al. : Wading Simulation - Challenges and Solutions, SAE Technical paper（2014），2014-01-0936，doi:10.4271/2014-01-0936

（8）Mohan Makana et al. : Passenger Car Water Wading Evaluation Using CFD Simulation, SAE Technical paper（2016），2016-28-0072，doi:10.4271/2016-28-0072

（9）越塚誠一ほか：粒子法入門，丸善出版，pp.24-27（2014）

（10）Prashant Khapane et al. : Water Ingress Analysis and Splash Protection Evaluation for Vehicle Wading using Non-Classical CFD Simulation, SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems, pp.183-194（2017）

■著　者■

丸山 慧

土屋 明宏

吉田 敏弘

山根 貴和

上岡 孝志

落岩 克哉

論文・解説

20

高精度ダイカストによる機械加工レス成形の実現

Realization of No Processing Manufacture with Highly Accurate Die-cast

佐々木　大地 *1　重里　政考 *2　山本　綾人 *3
Daichi Sasaki　Masatoshi Juri　Ayato Yamamoto
河野　一郎 *4　藤井　祥平 *5　小国　英明 *6
Ichirou Kouno　Shouhei Fujii　Hideaki Oguni

要　約

マツダのブランドエッセンスである「走る歓び」を実現するため，クルマの高機能化に合わせて素形材部品には高精度化と軽量化の要求が高まっている。その中で，エンジン構成部品のシリンダーブロックは，軽量なアルミダイカスト工法で製造される。シリンダーブロックは，内部に「メインオイルギャラリ」と呼ばれる潤滑オイル分配用の穴を備えており，鋳抜きピンで成形されるが，この穴が鋳造の過程で曲がる課題があり，後工程の機械加工で曲り部分を切削していた。穴が曲がるメカニズムの解明とモデル化を行い，それを制御する金型技術を確立したことで，機械加工レス成形を実現した。本稿ではこの取り組みについて報告する。

Abstract

For the realization of “Celebrate Driving”, Mazda’s brand essence, importance of improving accuracy and saving weight in casting parts is increasing corresponding to higher functionalization of cars. One of those parts, a cylinder block, composes a part of the engine and is manufactured in aluminum die-cast process for saving weight. It has one or two holes called “main oil gallery” to distribute lubricating oil are molded by the core pin. We had an issue that the holes were often bended in die-cast process, therefore the bent area was cut by machining. We elucidated the mechanism of bending, modeled it, and established a mold technology to prevent the core pin from bending. This technology enables us to manufacture the part without cutting by machining. This paper reports our activities.

Key words : Production・Manufacture, Formed and fabricated materials, Casting/forging, Design/prototyping, Die/mold, Die-cast, MBD, Core pin, Die design

1. はじめに

走る歓びと優れた環境・安全性能を備えた商品の実現に向け，パワートレイン鋳造部品の生産技術ではアルミダイカストによる軽量化と低コスト化の両立を図ろうとしている。一般的に，鋳造部品は抜き勾配や素材の鋳造変形，鋳肌面の粗さに起因して仕上げ加工が必要である。そこで，鋳造品の寸法精度を向上させて，最終製品形状を成形することで，仕上げ加工を廃止し，CO_2 の排出抑制に貢献できる。

今回，鋳造品の寸法が決まるメカニズムを解明し，その挙動をモデル化した。それを用いたモデルベース開発を行うことで，エンジン部品の仕上げ加工を廃止したので，以下に報告する。

2. ダイカスト鋳抜きピン曲りの実態と課題

エンジンの中で最も大きな部品であるシリンダーブロックは，アルミダイカストで製造されるが，気筒配列方向に貫通する「メインオイルギャラリ」と呼ばれる潤滑オイル分配用の穴が設置されている。この穴は，ダイカスト金型の対面する 2 つのスライド型に設置した鋳抜きピンで両側から鋳抜いて成形する。例えば 2000cc クラスの 4 気筒シリンダーブロックでは，合わせた長さが約 400mm にもなる鋳抜きピンが，突合せ部で 1mm 以上曲った状態（Fig. 1）で穴形状が成形される。当初，溶融アルミの熱による膨張が原因と推測し，突合せ部に隙

*1〜6　パワートレイン技術部
Powertrain Production Engineering Dept.

間を設けた状態（Fig. 2）で鋳造することで曲り量を軽減した。しかし，隙間を設けることで無用な壁が形成されるため，これを貫通する加工と，軽減したとはいえ残存する曲りを勘案した加工が必要になっていた。そこで，鋳抜きピン曲りのない貫通した穴の最終製品形状を成形することを理想に掲げ，目標値を「穴曲り 0.1mm 以下」と設定した。目標達成に向け，鋳抜きピンが曲るメカニズムの解明とモデル化，それを制御する金型技術の確立に取り組んだ。

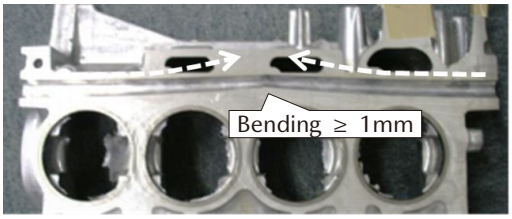


Fig. 1　Conventional Structure（Simply Butting Pins）

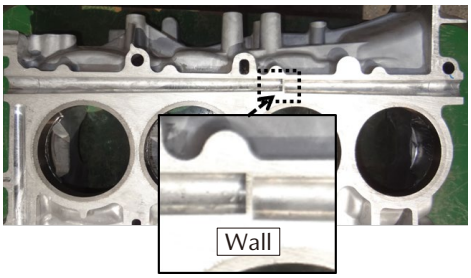


Fig. 2　Current Structure（with Wall）

3. 鋳抜きピン曲りのメカニズム

鋳抜きピン曲りのメカニズム解明に向け，ダイカストの各工程における鋳抜きピン挙動の計測技術を開発した。

ダイカストは，閉じた金型のキャビティ内に溶湯を高速（≧60m/sec）で射出して高圧（≧約 60MPa）で成形する工法のため，キャビティ内にある鋳抜きピンの挙動を直接観察することはできない。そこで，鋳抜きピン内部や金型に固定している構造部に熱電対やひずみゲージを設置した 4 気筒シリンダーブロックのテスト金型を製作し，間接的な挙動測定を実施した（Fig. 3）。

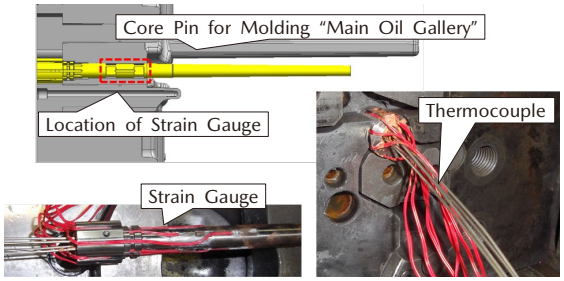


Fig. 3　Measurement Structure（of Verification Die）

ダイカスト工程の最初から最後まで（型締め→注湯→射出→凝固（チル）→離型）を連続的に測定することで，鋳抜きピンの曲りに関係していた 2 工程を明確にし，実測データ分析から曲りのメカニズムを推定して定式化（＝モデル化）した。以下，メカニズム解明とモデル化の取り組みを紹介する。

3.1　射出工程での溶湯衝突による曲り

（1）溶湯衝突曲りメカニズムの推定

射出工程は，高速射出から充填完了までが 0.1sec 以内のため，キャビティ内を流れる溶湯流速は 60m/sec を超える。そのため，溶湯が鋳抜きピンに衝突する際には大きな衝撃荷重が作用し，曲りが発生していると推測した。曲りの発生は溶湯衝突の瞬間から極短時間であると考えられ，溶湯流速等から勘案すると，この現象をとらえるために必要な計測単位の細かさは 0.001sec 以下であり，高速度応答の計測が必須となる。そこで，鋳抜きピンに直接ひずみゲージを貼り付けて計測する構造を考案した。

鋳抜きピンは金型に開けられた勘合穴の裏面から差し込んで設置する構造となっている。そのため，キャビティ部で発生した曲げひずみは金型差し込み部でも検出が可能と考え，キャビティ部から 3mm 内側の勘合部に設けた平面にひずみゲージを設置した。ひずみゲージで曲げを測定するには，曲がりが発生している部分の対面する圧縮面と引張面にひずみゲージを張り付ける必要がある。そのため，一方向の設置では鋳抜きピンの曲がり方向と直角の場合に検出できない可能性があるため，角度を 90°ずらした二方向に配置し計測した。その結果，射出～充填完了の間にインパルス応答関数に近似した振動の発生をとらえることができた（Fig. 4）。

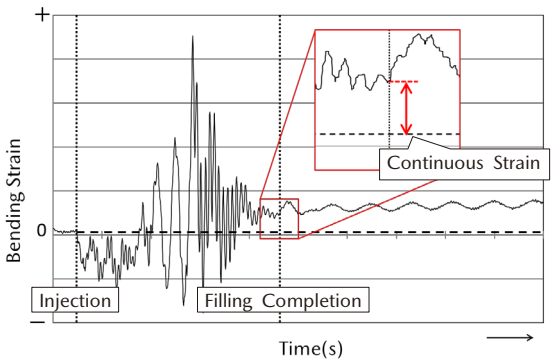


Fig. 4　Bending Strain of Core Pin

以上より，鋼材の構造体である鋳抜きピンに衝撃荷重が作用して曲げ（振動）が発生していると考えた。この振動波形を分析すると，射出直後から振動が発生し始め，その後次第に減衰しているが，減衰中心が振動発生前と比べてずれている。このため，振動発生時に鋳抜きピン突合せ部に発生した隙間に溶湯が侵入，急冷凝固して堆積し，鋳抜きピンが曲がった状態で成形されるメカニズムであると推定した。

（2）溶湯衝突曲りのモデル化

溶湯衝突曲りのメカニズムは，Fig. 5 に示すように，鋳抜きピンを金型に差し込まれた側を固定端とした片持ち梁として，溶湯衝突による分布荷重が作用して振動（たわむ）する物理現象（＝モデル）と考えられるので，分布荷重に対する弾性体のたわみ式によるモデル化が適切である。

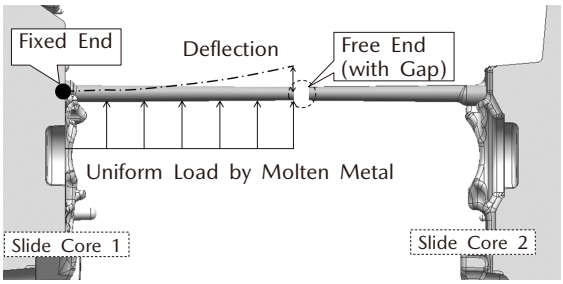


Fig. 5　Cantilever Model of Core Pin

自由端の変位量は，曲げモーメントを一定とした場合，ヤング率と断面二次モーメントに反比例するが，どちらの変更にも制約がある。例えば，必要な断面二次モーメントをたわみ量から算出すると鋳抜きピン径がΦ30mm以上必要であり，製品形状が成立しない。一方，片持ち梁はたわみが発生しやすいので，自由端側を固定端化するという考え方もある。ただ，自由端のない 1 本の鋳抜きピンの両端を金型で固定してメインオイルギャラリ穴を成形すれば両端固定梁に近い状態になるが，長い鋳抜きピンを離型するためのスライドストロークを確保するために，設備や金型汎用部の改造が必要になる。更に，抜き勾配によって，鋳抜きピンが太くなる。そこで，現状の鋳抜きピン 2 本を対面させる方式で，互いのピンが押し合うことで疑似的な両端固定梁を構築した。

このときの力のつり合いモデルを Fig. 6，7 に示す。軸荷重をかけて押し当てた鋳抜きピンは接触面が一致して一様な圧縮荷重が発生した両端固定梁状態となっている（Fig. 6）。その状態で溶湯による横荷重を受けると，鋳抜きピンの突き当て部では，圧縮荷重による縮み変位に加えて曲げ荷重による縮み変位と引張り変位が発生する（Fig. 7）。このときに，曲げによる引張変位が軸荷重の圧縮変位より大きいと，接触面が開いてしまい，突き当てを維持できなくなって隙間が発生する。その瞬間に，突き当て面にアルミが差し込むことで曲がって成形されてしまう。

以上より，溶湯衝突による曲りを抑制するためには，鋳抜きピンを突き合わせる軸荷重制御が必要である。そのときの軸荷重：F を求める関係式を Fig. 8 以下に示す。両端固定梁状態の鋳抜きピンに軸荷重：F が作用しており，溶湯衝突荷重：W が加わって，式(a)に示すたわみ量：X が発生している。片側の鋳抜きピンに着目すると，h_0 から h' 圧縮変位すると同時に，X のたわみ量が発生していることで見かけ上は長さ：h'' となっている。このとき，見かけ上の鋳抜きピン長さ：h'' が元の長さ：h_0 より短ければ，接触面全面に圧縮応力が働いていることになるため，接触面が開かないと判定できる。その判定式を(b)に示す。判定式を基に，軸荷重：F を求める式に展開したのが式(c)である。式の中で，鋳抜きピン径，長さ，断面形状については製品機能要求から決まり，溶湯衝突荷重については溶湯湯流れシミュレーションを使って算出する。

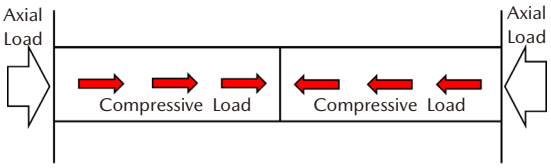


Fig. 6　Core Pin in The State of Both Ends Fixed Beam

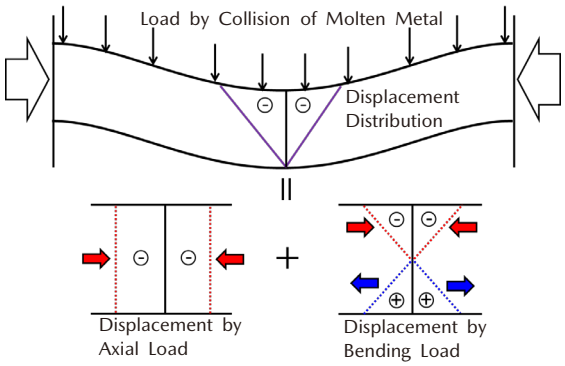


Fig. 7　Equilibrium of Forces at Fixed End Beam

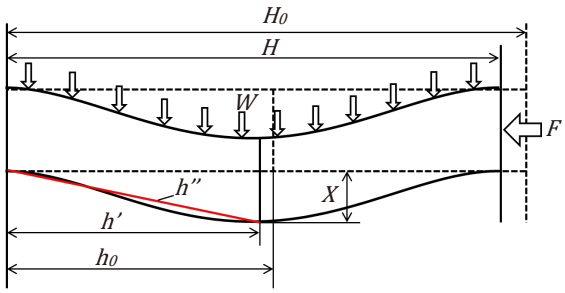


Fig. 8　Illustration of Variables in Equations (a, b, c)

$$X = v_{st}\left(1+\sqrt{1+2H/v_{st}}\right) \quad \cdots\cdots (a)$$

ただし，$v_{st} = \dfrac{Wh^3}{192EI}$

$$h_0 \geq h'' = \sqrt{X^2 + h'^2} \quad \cdots\cdots (b)$$

ここで，$h' = h_0(1-\varepsilon) = h_0\{1-(F/EA)\}$ より

$$F \geq EA\left(1-\sqrt{1-x^2/{h_0}^2}\right) \quad \cdots\cdots (c)$$

ここで，X：たわみ量［mm］，E：ヤング率［MPa］，W：溶湯荷重［N］，I：断面二次モーメント［mm^4］，v_{st}：静荷重でのたわみ量［mm］，H_0，h_0：元の長さ［mm］，H：変形後の長さ［mm］，F：荷重［N］，h'：片側ピン長さ［mm］，h''：見かけ上のピン長さ［mm］

3.2　チル工程での熱膨張による曲り

（1）熱膨張曲りメカニズムの推定

チル工程は溶湯充填から凝固までであり，充填前に金型を冷却する内冷水によって常温まで冷却された鋳抜きピンは溶湯熱の影響を受けて温度上昇する。このとき，金型によって両端が拘束されているため，これを起点に長さ方向に熱膨張し，突き当て面で大きな圧縮応力が発生する。この応力がチル工程中に鋳抜きピンの座屈応力に達することで座屈変形していると推測した。

この現象をとらえるため，鋳抜きピン内部に複数の熱電対を設置して温度を測定し，同時に前出の鋳抜きピン勘合部に設置したひずみゲージで圧縮ひずみを測定した。その結果，充填直後から鋳抜きピン温度が上昇し，同時に圧縮ひずみが発生した。その後，温度上昇が続くが，途中で圧縮ひずみの減少（青矢印）と曲げひずみの発生（赤矢印）が観察された（Fig. 9）。圧縮ひずみが曲げひずみに変換されており，鋳抜きピンがチル工程中に座屈変形を起こしたことが確認できた。

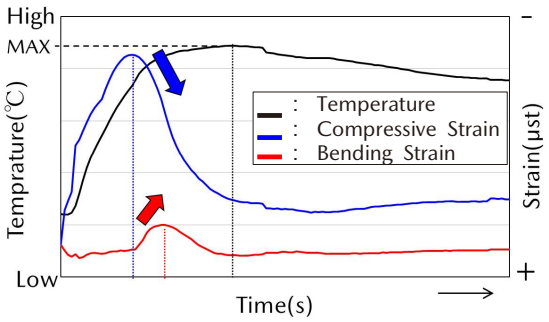


Fig. 9　Temperature and Strain at Chill Time

（2）熱膨張曲りのモデル化

座屈変形を引き起こす応力はオイラーの式で求められるが，3.1 節で述べた，射出工程での曲り抑制のための軸荷重による圧縮応力と，熱膨張により発生する圧縮応力の合算となる。熱膨張による圧縮応力を抑えるには，鋳抜きピンの温度が上がらないようにするか，熱膨張しない材質とするか，金型で吸収する構造が必要である。そこで，ロバスト性を確保するために熱膨張量を金型で吸収する方向で対策を考案する。

そこで，鋳抜きピンの温度推移を観察すると，初期温度から最高温度に達する時間は充填完了後約 1sec であり，その後緩やかに温度低下して次サイクル開始時には初期温度に戻っている。一方，金型全体は鋳造サイクルを重ねるにつれて徐々に温度上昇する（Fig. 10）ため，熱膨張してわずかに大きくなる。これも鋳抜きピンの見かけ上の熱膨張量に影響する。

以上より，鋳抜きピンの熱膨張による座屈変形を抑制するためには，式(d)より求まる熱膨張量を吸収できる金型構造が必要である。

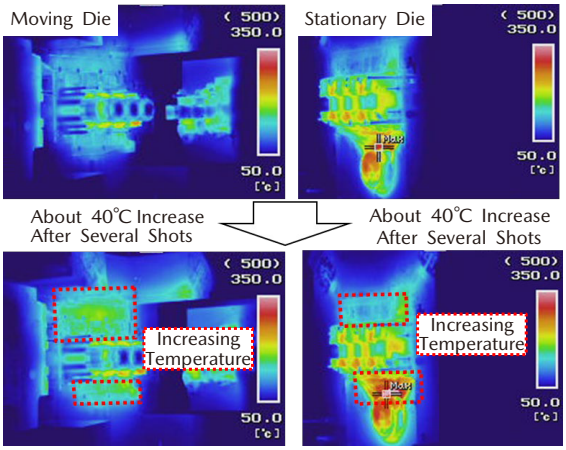


Fig. 10　Die Temperature Before and After Several Shots

$$\Delta h = \alpha H_0 (T' - T'') + \alpha H_0 (T - T') \quad \cdots\cdots (d)$$

ここで，Δh：熱膨張量［mm］，α：線膨張係数［1/℃］，H_0：元の長さ［mm］，T：数サイクル後の最高温度［℃］，T'：1 サイクルの最高温度［℃］，T''：初期温度［℃］

4. 鋳抜きピン曲りを抑制する型構造

鋳抜きピン曲りを抑制するためには，①溶湯衝突による曲りと，②熱膨張による座屈を同時に抑制する必要がある。

ここで，金型設計における抑制の考え方は，①に対しては，対面する鋳抜きピンを互いに強く押し付けることで溶湯衝突によるたわみ量を突合せ面に隙間ができないレベルに軽減する，②に対しては，熱膨張量を吸収することで圧縮応力の発生を座屈応力以下に軽減する，となる。

前項で定式化したとおり，①のたわみ量は軸荷重と溶湯衝突による「分布荷重」から，②の圧縮応力は鋳抜きピンの後退量と「熱膨張量」から算出可能である。このうち，軸荷重と後退量は金型設計で設定する値なので，「分布荷重」と「熱膨張量」を求める必要がある。そこで，金型設計時にこれらを算出するために，鋳造シミュレーションを利用して，それぞれを溶湯流速と金型温度の解析値から求めた。

次に，この軸荷重と鋳抜きピンの後退量を制御する金型構造として，バネによる突き当て構造を考案した（Fig. 11）。型閉じ時に対面する鋳抜きピンは互いを押す関係にあり，この時，鋳抜きピン根本部に設置したバネの反発力により必要な軸荷重を発生するが，その状態から鋳抜きピンが熱膨張してもバネの収縮ストロークによりそれを吸収する仕組みである。

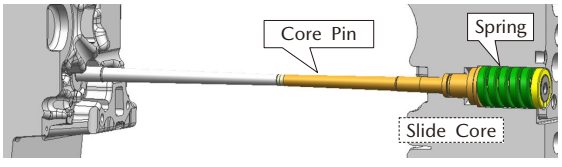


Fig. 11　Butting Structure with Spring

そこで，この構造をテスト型に織り込んで実鋳造にて確認した。このときに，バネの動作と鋳抜きピンの動きを数値化するため，鋳抜きピンに軸方向の変位センサーを設置して鋳造した。そのときの変位量測定結果をFig. 12 に示す。スライドの型締め動作を利用してバネを収縮させて軸荷重を与え，射出工程ではバネの収縮により熱膨張量を吸収することができた。

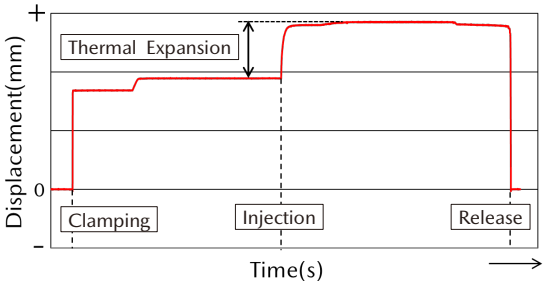


Fig. 12　Core Pin Displacement in One Cycle

しかし，金型が開いて製品が離型されることで鋳抜きピンは初期位置に戻るが，サイクルを重ねると初期位置に戻らなくなる現象が発生した。そのときの状態を確認すると，鋳抜きピンと金型の摺動部に薄いアルミの破片が入り込んでおり，摺動抵抗が増加して鋳抜きピンが動かなくなっていた（Fig. 13）。

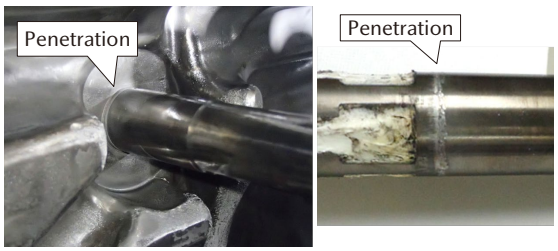


Fig. 13　Aluminum Penetration to Sliding Part

アルミの破片は，溶湯充填時に鋳抜きピンと金型勘合穴の隙へ溶湯が侵入して凝固したものであり，鋳造を重ねるにつれて少しずつ堆積していく。鋳抜きピンの摺動時には，金型勘合穴との摩擦力に加えてアルミ破片の剪断力が摺動抵抗となる。この摺動抵抗がバネによる軸荷重よりも大きくなることで鋳抜きピンが動かなくなったと考えられる。そのため，金型離型時にアルミ破片を排出するための軸荷重と摺動量を満たすバネ荷重特性を検討した。このとき，バネ定数が大きいと熱膨張時に鋳抜きピンの座屈荷重に達してしまうため，バネ定数はできる限り小さくする必要がある。

ここまでを踏まえたバネ荷重特性を Fig. 14 に示す。アルミ破片を排出する軸荷重をかけた状態で金型に組み込み，突き当て後に摺動量分を更に押し込んだ状態で鋳造開始する。そのときに，前出の軸荷重判定式以上の荷重となっている必要がある。鋳造中は熱膨張吸収の摺動があっても鋳抜きピンの座屈荷重未満で推移する。

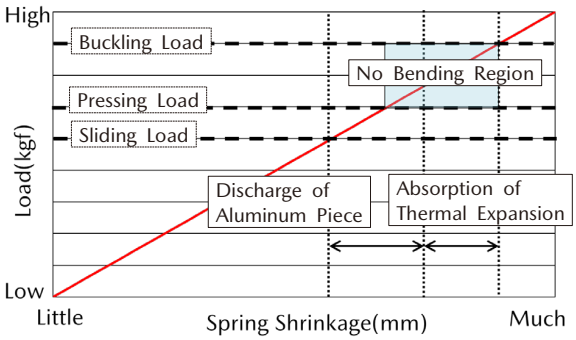


Fig. 14　Spring Load Characteristic

しかし，以上の条件を満足するバネを単純に選定すると金型サイズに対して非常に長い自由長となる。そこで，各過程で理想のバネ荷重特性を考えると，鋳抜きピンを突き当てたときにアルミ破片排出のための必要荷重以上に瞬時に達し，その後は荷重を維持したまま摺動すればよい。つまり，初期の短い摺動間ではバネ定数を大きくし，一定の荷重に達したときにバネ定数の小さく長いストロークのバネに変化する 2 つの荷重特性をもつということである。そこで，バネ定数の違う 2 つのバネを直列に並べた「2 重バネ構造」を考案し，理想のバネ荷重特性を実現した。そのときの荷重特性を Fig. 15 に示す。

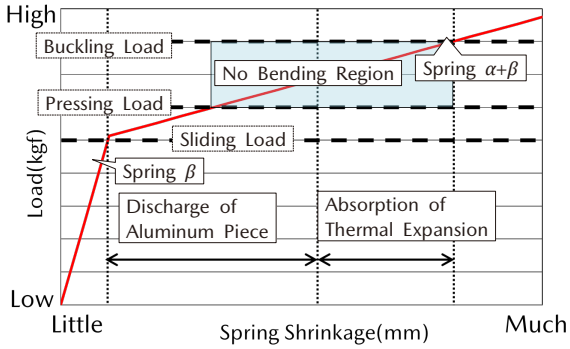


Fig. 15　Double Spring Load Characteristic

2 つのバネのうち，バネ定数の小さいバネ α についてアルミ排出荷重を掛けて縮めた状態でセットしておき，その荷重まではバネ定数の高いバネ β 単独の荷重特性で摺動させる。このときの式は(e)であり，僅かな摺動量で荷重を増加させることができる。バネ β がバネ α の荷重に達すると，バネ双方が縮み始めるが，このときバネ α とバネ β が直列合成された式(f)となり，摺動量に対して荷重が小さくなる。

この 2 重バネ構造により，バネ単体構造に対して約半分のスペースで，金型内に設置可能となった。

$$F_\beta = k_\beta x \qquad \cdots\cdots (e)$$

$$F_{total} = \frac{k_\alpha k_\beta}{k_\alpha + k_\beta} x \qquad \cdots\cdots (f)$$

ここで，F_β：バネ β の荷重［N］，k_β：バネ β のバネ定数

[N/mm]，x：ストローク量［mm］，F_{total}：バネ α とバネ β の合成荷重［N］，k_α：バネ α のバネ定数［N/mm］

5. 成果

以上の構造を金型に織り込み鋳造確認した結果，目標値のメインオイルギャラリ穴曲り 0.1mm 以下に対し，半減の 0.05mm 以下で完全突合せを達成し，機械加工レス成形を実現した。測定結果を Fig. 16 に示す。

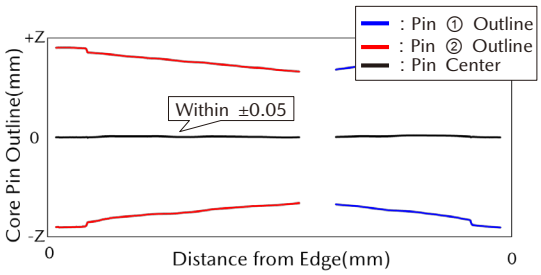


Fig. 16　（Measured）Pin Bending of Double Spring

また，鋳抜きピン曲りのメカニズムを解明してモデルを構築したことで，溶湯衝突時に必要な軸荷重から熱膨張量までを CAE で検証する方法も確立した。その CAE 結果から，鋳抜きピン位置を溶湯流速の速い鋳込みゲート側に設置したテスト型を製作して実鋳造確認したところ，同様に曲りのない突合せ穴を成形することができた。Fig. 17 にそのときの試作品を示す。

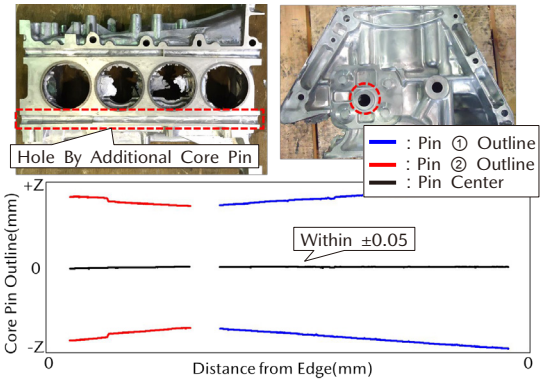


Fig. 17　Trial with Mold Equipped Additional Pin

以上のように汎用性の高い技術であり，今後さまざまなダイカスト部品へ応用することで，更なる製品機能の向上に貢献する。

6. おわりに

これまでダイカストにおける鋳抜きピン曲りは常に発生するものであり，発生した曲りに対して金型を補正することで対処してきた。今回，鋳抜きピン曲りを事前評価する金型設計技術を確立したことで，製品設計の段階から製品機能と生産性を両立する鋳抜きピン提案ができるようになった。この活動を通じて，現状に満足しない問題意識の構築と現象の現場現物による詳細な分析，課題解決まで諦めずに考え抜くことの重要さを再認識できた。

また，ダイカストにおいて高精度な品質の製品を造りだすためには，瞬間的な溶湯の挙動や金型温度変化を正確にとらえることが必要であると分かった。現在，溶湯から金型内部までの詳細温度分布測定に取り組んでおり，新製品のモデルベース開発による評価・改善・改良と機能向上に貢献する金型技術の更なる向上を目指していく所存である。

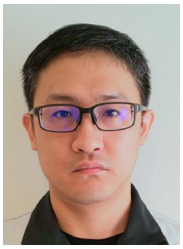
今後も，全てのステークホルダーへ笑顔を届けられるクルマ造りに向けて，技術革新への挑戦を続けていく。

この論文は（株）日刊工業新聞社 型技術 2021 年 7 月号に投稿した内容に追記・転載したものです。

■著　者■

佐々木 大地

重里 政考


山本 綾人

河野 一郎

藤井 祥平

小国 英明

論文・解説

21

CO_2 と VOC を同時に削減する VOC 回収技術の実現

VOC Recovery Technology for Reduction of CO_2 and VOC Simultaneously

加藤　雄 *1　篠田　雅史 *2　寺本　浩司 *3
Yu Kato　Masafumi Shinoda　Kouji Teramoto

要　約

世界規模で環境保全への意識が高まる中，自動車生産における環境負荷物質の排出量低減の取り組みは非常に重要である。当社は，技術革新で工程や機能を集約する考え方により，自動車塗装工程から排出される CO_2 と揮発性有機化合物（Volatile Organic Compound，以下 VOC）を包括的に削減する取り組みを継続している。

自動車塗装工場における一般的な塗装乾燥炉では，塗料に含まれる VOC を燃焼処理し無害化しているが，燃焼方式という特性から CO_2，窒素酸化物（Nitrogen Oxides，以下 NO_X），煤塵などを発生させている。今回，省エネルギーに配慮したシステム設計を行うことで乾燥炉の排気ガスから VOC を回収する技術を開発し，電着乾燥炉に導入した。その結果，燃焼式排気処理の休止とクローズドシステムによる排気ガスの排出ゼロを実現し，CO_2 と VOC の同時削減を達成した。

Abstract

With the growing awareness of environmental conservation on a global scale, efforts to reduce the emission of environmentally hazardous substances in automobile production process have become extremely important. We are continuing our efforts to comprehensively reduce CO_2 and volatile organic compounds (VOCs) emitted from the automobile painting process based on the idea of consolidating processes and functions through technological innovation.

In a general paint oven in an automobile painting plant, VOCs contained in paint are burned to make them harmless. However, CO_2, NOx, soot, and dust are generated due to the characteristics of the combustion method, CO_2. Therefore, we have developed a technology to recover only VOCs from the exhaust gas in the paint oven, and designed the system with consideration for energy saving, so that we could introduce it into the electrodeposition paint oven. As a result, we have achieved simultaneous reduction of CO_2 and VOC by realizing suspension of combustion-type exhaust processing and zero exhaust gas emissions using a closed system.

Key words : Paint Oven, VOC Recovery, CO_2 Reduction, Heat Pump

1. はじめに

自動車製造における塗装工場の環境負荷は大きく，地球温暖化につながる CO_2 削減と大気汚染の原因物質である揮発性有機化合物（VOC）の排出量削減は重要課題である（Fig. 1）。

この課題に対して当社では，CO_2 と VOC を同時削減する独自の塗装技術として，2002 年に「スリー・ウェット・オン塗装」を開発し，国内外の全塗装工場に展開した。2009 年には VOC を大幅に削減可能にする「アクアテック塗装」[(1)] を開発し，更なる同時削減を行った（Fig. 2）。

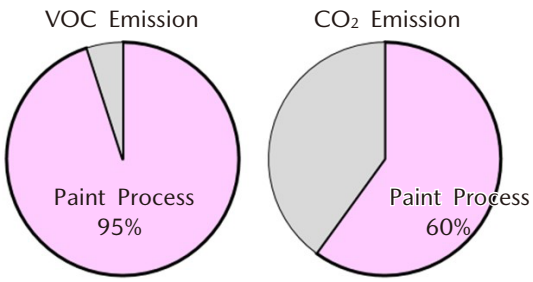


Fig. 1　VOC and CO_2 Emission of Paint Process

*1〜3　車両技術部
Painting, Trim & Final Assembly Engineering Dept.

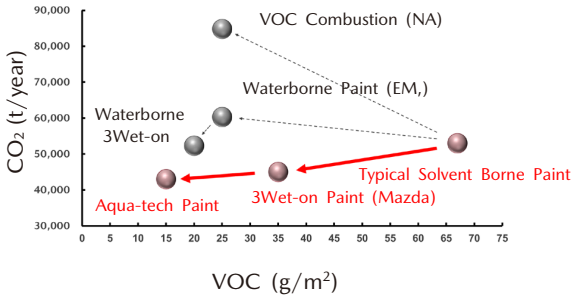


Fig. 2　Effect of Aqua-Tech

これらの技術は，材料機能と設備機能の追求により塗装工程を革新して CO_2 と VOC の同時削減を可能にするもので，今回は，この考え方を塗装乾燥炉に拡大して，CO_2 と VOC を同時削減することを目的とした（Fig. 3）。

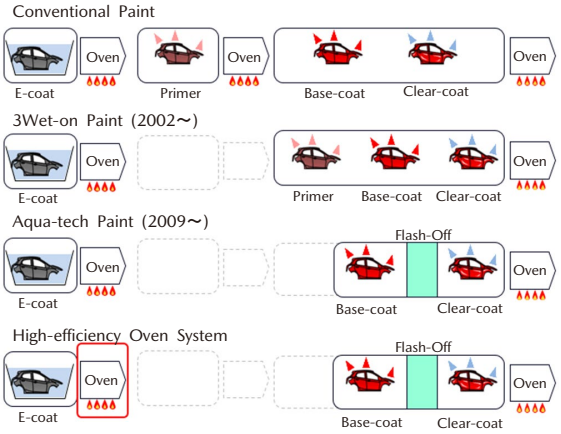


Fig. 3　Process Transition

2. 課題とアプローチ

塗装乾燥炉の機能は，ボディーに塗装した塗膜の乾燥と硬化である。乾燥炉は，140℃以上に加熱した熱風でボディーを温めている。その過程で水蒸気と VOC が発生するが，一定量を炉外に排出することで VOC 濃度を爆発限界以下にして安全を確保している。炉外に排出するガスは，大気汚染防止と近隣への臭気防止を目的として，排気処理装置により無害化して放出している。この排気処理装置は，200m^3/min 以上の大きな風量を連続的に処理する必要性から一般的には燃焼式を採用している。しかし，燃焼という方式ゆえに，VOC を処理する一方で CO_2，NO_X，煤塵を発生させている（Fig. 4）。

塗装乾燥炉の消費エネルギー内訳を調査すると，熱風加熱が 72%，排気処理が 28%である。塗膜の乾燥と硬化という乾燥炉の本来の機能から考えると，排気処理に消費されるエネルギーは全てロスととらえることができる（Fig. 5）。

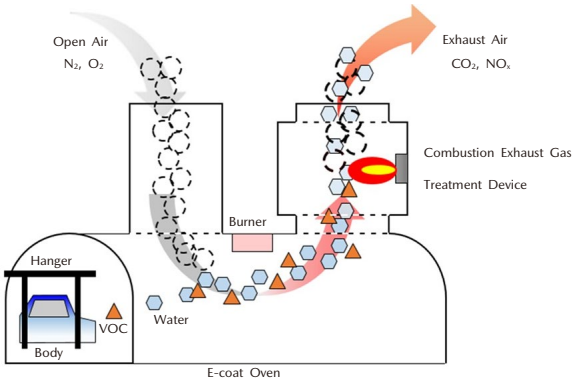


Fig. 4　Combustion Exhaust Gas Treatment Oven System

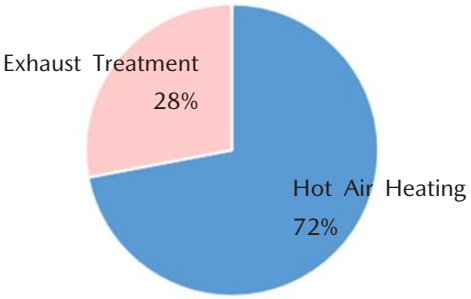


Fig. 5　E-coat Oven Energy

また，排気ガスの内訳は，VOC が 0.1wt%（1,000 ppmV），水蒸気が 2.5wt%で，残りは N_2，O_2，CO_2 など大気成分である。燃焼式の排気処理では，VOC 以外の大量の物質を加熱している。

以上より，排気ガスから VOC のみを選択的に回収して処理する技術の開発をアプローチとして，排気処理システムの抜本的な見直しに着手した。

3. VOC 回収技術開発

本技術の VOC を回収するしくみは以下である。[A] 水蒸気を冷却装置に取り込む，[B] 装置内部で水蒸気から熱を奪い凝縮水にする，[C] 凝縮水に VOC ガスを接触させ吸着させる，[D] 分離促進機にて液体を回収する。本技術では，VOC ガスに含まれる VOC 成分を 1 サイクルで 20%除去できた。VOC 回収効率を更に向上するには，VOC と水の接触機会を増やすことが有効と分かったため，[E] 処理後の空気を [A] に戻して [A]～[E] を何度も循環させるシステムを設計した（Fig. 6）。

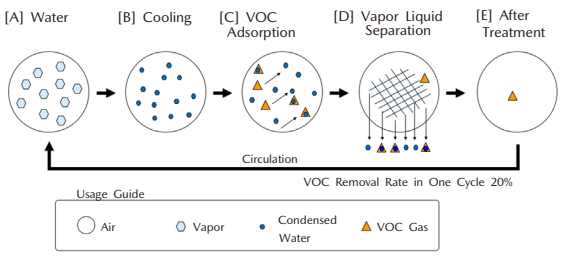


Fig. 6　VOC Recovery Technology

4. 高効率リサイクルシステム

［A］の水蒸気の取込みでは，乾燥炉内に存在する水蒸気を有効活用した。乾燥炉内の湿度分布を調査し，最も高湿度（22g/kg（DA））であった乾燥炉前半部の空気を冷却装置に引き込むことで，効率的に水を取込めるようにした。これには，乾燥炉起動直後など炉内湿度が低いケースも考慮して，水を自動補給する補助システムを装備した。また，［B］の冷却で奪った熱は高効率ヒートポンプを活用して，［E］の処理後空気の再加熱に使用しエネルギーのリサイクルを行うことで，システムの省エネルギー化を可能にした（Fig. 7）。

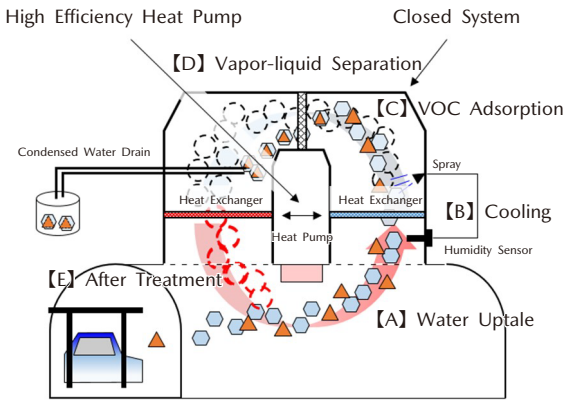


Fig. 7　VOC Recovery Oven System

これらにより，燃焼式排気処理の廃止とクローズドシステムによる排気ガスの炉外排出ゼロを実現して，塗装乾燥炉における CO_2 と VOC の同時削減を達成し，燃焼により発生していた煤塵・NOx も削減した。なお，回収した凝縮水は社内水資源再生場で，化学・生物処理により無害化して工場の外へ放流している。社内水資源再生場で要するエネルギーは，燃焼式排気処理装置比で 1,000 分の 1 以下である。

本システムを宇品工場 電着乾燥炉へ導入する工事を 2019 年 4 月に着工し，同年 8 月より VOC 回収装置の段階的導入を開始した。試運転調整（従来式と VOC 回収式の併用運転）期間を経て，同年 12 月に VOC 回収式 乾燥システムへ完全に切り替え，燃焼式排気処理装置を停止した。

5. 成果

塗装乾燥炉・排気処理設備のエネルギー削減により 710t/年（CO_2 換算）のエネルギー削減を達成した（Fig. 8）。これは，燃焼式排気処理システム比で 63%の削減となる。また，乾燥炉排気のゼロ化により，VOC，臭気，NOx，煤塵の排出ゼロを実現した。

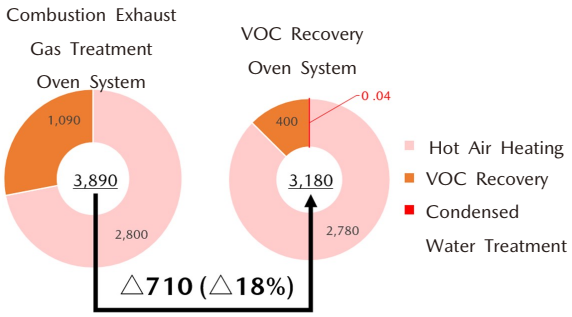


Fig. 8　VOC Recovery Oven System Energy [t-CO_2/year]

6. おわりに

マツダには，今回導入した燃焼式排気処理装置以外にも複数の同種設備をもっており，拡大展開を計画している。また，当システムは，水を利用することから 5L/min の VOC 成分を含んだ排水が発生する。現在は，社内水資源再生場で無害化して排出しているが，排水に含まれる成分の 99%が塗料成分と同じであるため，排水の成分分離などによる再利用の可能性を検討していく。

この論文は一般財団法人 省エネルギーセンター 月刊省エネルギー2021 年 2 月号に投稿した内容に追記・転載したものである。

参考文献

(1) 篠田雅史ほか：VOC と CO_2 を同時削減する新塗装技術「アクアテック塗装」，自動車技術，Vol.70，pp.77-82（2016）

■著　者■

加藤 雄

篠田 雅史

寺本 浩司

論文・解説

22 AIを用いた検査工程の精緻化・合理化への取り組み
Refinement and Optimization of Inspection Process Using AI

生田目　琢哉 *1　堀元　直生 *2　大谷　崇 *3
Takuya Namatame　Nao Horimoto　Takashi Otani
岩永　健太 *4　西野　恭弘 *5
Kenta Iwanaga　Yasuhiro Nishino

要　約

近年，労働人口減少による人手不足や，自動ブレーキ等の先進安全技術の普及による検査項目の増加などから，自動車業界において検査工程を省人化，効率化することは喫緊の課題となっている。本稿では，マツダが参画した国立研究開発法人新エネルギー産業技術総合開発機構（NEDO）の調査事業「AIを活用した自動車の完成検査の精緻化・合理化に係る調査」[(1)] におけるマツダの取り組み内容と，AIを用いた自動化システム開発・導入のガイドラインを紹介する。

Abstract

Saving man-power and improving efficiency at inspection process have recently become urgent issues in the automobile industry due to labor shortage caused by a decline in working population and an increase in inspection items by the spread of advanced safety technologies such as automatic braking. This report describes Mazda's activity and automation system guidelines by using AI, regarding the NEDO[(*a)] research business ("Project on the refinement and optimization of automobile completion inspections using AI") that Mazda has participated in.

(*a) NEDO: New Energy and Industrial Technology Development Organization

Key words : AI, Deep Learning, Automation, Inspection, Tire

1. はじめに

近年，少子高齢化により，国内の労働人口は年々減少しており，2040年には2020年比で約20%の労働人口が減少することが予測されている。また，自動車業界では自動ブレーキ等の先進安全技術の普及や，CASEと呼ばれる新しい領域での技術革新による車両のコネクテッド化など車両機能の高度化が進んでおり，車両の品質保証の重要性が高まっている。

マツダの生産技術では，今後の労働人口減少や車両機能の高度化を見据えて，ロボットやIoT（Internet of Things），AI（人工知能）などの最新技術を取り入れた高効率でフレキシブルな生産工程の実現を目指しており，その中でも近年発展の目覚ましいAIを用いた技術開発によって人の作業の自動化を進め，現業工数と間接工数の効率化に取り組んでいる。

本稿では，NEDO調査事業「AIを活用した自動車の完成検査の精緻化・合理化に係る調査」におけるマツダのリードテーマ「タイヤ仕様検査の自動化」の取り組みと，AIを用いた自動化システム開発・導入のガイドラインについて紹介する。

2. NEDO調査事業

2.1　NEDO調査事業について

本調査事業は，内閣府主導の「未来投資会議」の1テーマで，AI等のデジタル技術の活用によって「完成検査を人から機械へ置き換える可能性」を実証調査することが目的である。

実証調査は，デロイトトーマツコンサルティング合同会社，トヨタ自動車(株)，日産自動車(株)，本田技研工

*1〜3　車両技術部
Painting, Trim & Final Assembly Engineering Dept.
*4　品質保証部
Quality Assurance Dept.
*5　品質本部
Quality Div.

業(株)，マツダ(株)の 5 社共同の体制で，完成検査項目の自動化の可否及び自動化に必要な要件について，各社でテーマを分担し実施調査を行った。

2.2　完成検査について

現行の自動車の完成検査は，国土交通省が定める自動車型式指定制度に基づき国に代わって自動車メーカーが行うもので，現行の法令(※1)（自動車型式指定規則第 7 条）では，完成検査は完成検査員が実施することとされている。マツダの完成検査工程においても，教育・訓練された高い能力（視覚，聴覚，触覚，判断力等）の検査員で完成車両の仕様検査，機能検査，外観検査等を行っており，極めて高い検査精度が担保されている。

※1　現行の法令
　　2021 年 8 月現在

2.3　完成検査自動化の課題

現行の検査員による完成検査は，生産工程で発生するさまざまな変動にもフレキシブルに対応し，高い検査精度を担保している。当然ながら，自動検査システムが不具合品を誤って良品と判定し，市場流出させることはあってはならないため，完成検査自動化の大きな課題として「検査員と比較して同等以上の検査精度の達成」がある。

2.4　完成検査自動化の考え方

本調査事業においては，前述の「検査員と同等以上の検査精度」を「合理的に想定される範囲において機械と検査員（人）で不具合品の流出防止を確実に保証するもの」と定義した。これは機械だけで 100%の検査精度を追求するのではなく，AI 判定が少しでも曖昧な判定結果の場合には人に判断を委ねて，検査員が実物状態を確認することで不具合品の流出を確実に防止する考え方である。

この考え方に基づき自動検査システムの判定精度の達成目標を以下とした。

（1）不具合品の流出率＝0%
（2）判別の誤謬率＝0%となる適切な分類閾値設定
（3）検査精度の維持管理に必要な項目の要件化

下記に「流出率」,「誤謬率」,「不明」の定義を示す。

【流出率】検査システムが不具合品を誤って OK 判定する確率（実物の状態と不一致の判別数÷全サンプル数×100）
【誤謬率】検査の判別結果（不明を除く）が「実物の状態」を誤って判別する確率（実物の状態と不一致の判別数÷(全サンプル数－不明数)×100）
【不　明】検査の判別結果を分類した結果，閾値未満のもの

2.5　NEDO 調査事業の取り組みテーマ

本調査事業では，完成検査ラインの全検査項目（172 件）より，AI 等のデジタル技術を活用した自動化に対して技術的に見込みがある検査項目（72 件）を分類し，更に中長期にわたり効果が見込めると想定される 10 テーマを選出した（Fig. 1）。

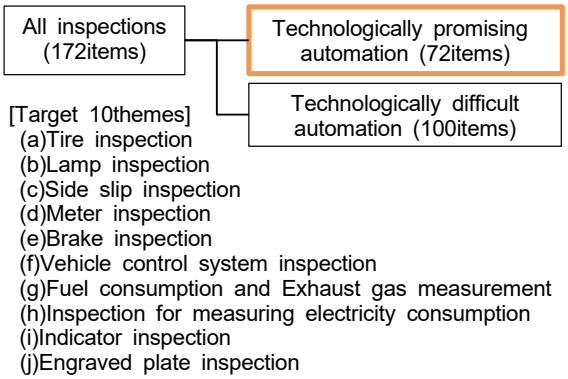


Fig. 1　NEDO Themes

この中で，マツダは「タイヤ仕様検査の自動化」の実証調査を担当し，自動化の実現可能性，自動化に求められる要件，及び想定効果の検証を宇品第 2 工場完成検査ラインにて行った。

3. タイヤ仕様検査の自動化

3.1　タイヤ仕様検査について

現行のタイヤ仕様検査は，自動車の 4 輪に対して，完成検査員が足腰を曲げた屈み作業で，目視によりタイヤに刻印された仕様（メーカー・シリーズ・タイヤサイズ）が型式指定制度に基づいた届出申請書と相違がないか確認している（Fig. 2）。

この検査においても検査員は，ゴム刻印の僅かな段差（約 0.5mm）からマークや文字を読み取り，メーカーごとに異なる字体や，水滴や異物の付着など，さまざまな変動に対して，人の高い補正能力（視覚，記憶，判断）でフレキシブルに対応している。

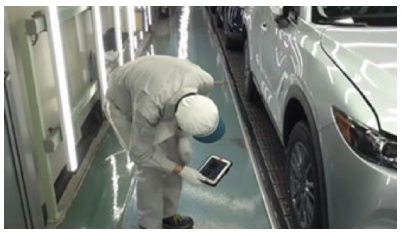


Fig. 2　Tire Inspection

3.2　タイヤ仕様検査自動化の課題

タイヤ仕様検査の自動化において，検査員と同等以上の検査精度を実現するためには，人の精緻な視覚認識や状況判断を自動検査システムに組み込まなければならな

い。また，一般的な画像処理技術による目視検査自動化の事例は多数あるが，人の視認と判断のルール（画像処理）を設計する必要があり，導入後に新しく検査対象が追加されるとフレキシブルに対応できず，ルールの再設計や維持管理のための間接工数が増加してしまう課題がある。

これらの課題「検査員の精緻な能力の代替」，「自動化による間接工数増加の抑制」に対して，本取り組みでは，以下の開発コンセプトで課題解決に取り組んでいく。

- 精緻なセンシング技術を用いて，外乱光などの変動に強い安定した画像取得（人のフレキシブルな視覚認識の代替）
- AI 技術を用いて，生産工程のさまざまな変動に中長期にわたり対応できる自動検査システム（人のフレキシブルな状況判断の代替，間接工数増加の抑制）

3.3　タイヤ仕様の自動検査システムの開発

（1）タイヤ仕様（刻印）の画像化

本取り組みでは，精緻なセンシング技術を用いた画像取得で「人のフレキシブルな視覚認識の代替」を目指す。

タイヤ側面に刻印されているメーカー，シリーズ，タイヤサイズ（Fig. 3）の画像化は，タイヤと判別対象の刻印が同じゴム素材である。そのため，黒背景に黒文字となり，一般的な照明とデジタルカメラでは，画像化の難易度が高く，また外乱光の影響を受けやすい。そこで，本取り組みではタイヤ仕様（刻印）の凹凸形状に着目した画像化処理方法（タイヤ側面の形状計測による画像化）を考案した。

Fig. 3　Camera Image (Tire)

この画像化処理方法は，タイヤを回転させながらレーザー変位計でタイヤ側面の形状を計測し，タイヤ全周の 3 次元形状データを，基準面に対する高さで 256 階調の濃淡データに変換し画像化する方法である。（基準面を 128，基準面から－1.5mm を 255，基準面から＋1.5mm を 0）

この方法によって，外乱光などの設置環境の変動に依存せず，タイヤ仕様（刻印）を鮮明に画像化できた（Fig. 4，5）。

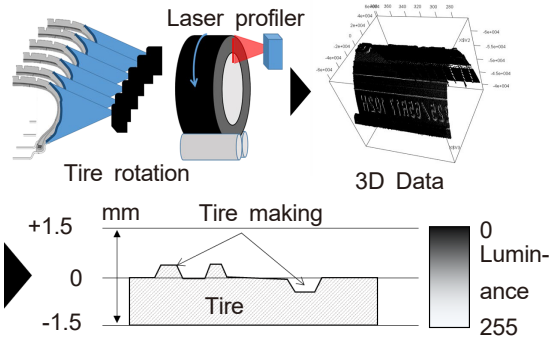


Fig. 4　Tire Side Measurement and Imaging

Fig. 5　Tire Specification Image

（2）AI を用いたタイヤ仕様判別

本取り組みでは，AI の深層学習の 1 つ「畳み込みニューラルネットワーク（CNN）」を用いた自動検査システムで「人のフレキシブルな状況判断の代替，間接工数増加の抑制」を目指す。

CNN 判別モデル[※2] を用いた仕様判別をタイヤメーカーの事例（Fig. 6）で説明すると以下のとおりである。

①生産工程で取得したタイヤ画像を判別モデルに入力
②判別モデルは学習済タイヤメーカー全てのスコアを出力
③最も高い出力スコアのタイヤメーカーを判別結果とする

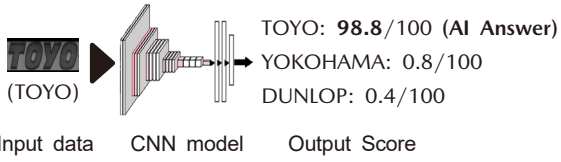


Fig. 6　CNN Model (Manufacturer)

なお，出力スコアは，AI が自信をもって判別しているかの指標となり，出力スコアの差が僅かであれば曖昧な判別といえる。

また，CNN 判別モデルは，仕様判別のためのルール（判別の特徴量，特徴量の演算式）の設計が不要で，検査対象画像を準備するだけで学習による判別モデルの構築が可能である。

そのため，従来の画像処理では必須であったルール設計のための間接工数を抑制することができる。

※2　CNN 判別モデル
本取り組みでは Oxford 大学の研究グループが提案した 16 層からなる CNN モデル（VGG16）を使用する

（3）仕様判別モデル構築の効率化

一般的なAIの使い方では，全ての事象を網羅した学習を行うアプローチで，膨大な学習データ（数千から数万）が必要であり，生産工程への適用は，膨大なデータ蓄積や学習の手間等の間接工数を考慮すると現実的ではない。そこで，本取り組みでは，CNN判別モデルの効率的な構築（AI学習の効率化）を目指す。

本取り組みでは，以下①～④のとおり，予見される学習画像の変動を画像処理で再現し，あらかじめ学習データに織り込むことで，少ない基本学習データでも効率的なモデル構築を行った。

①基本学習データを準備：統計的な分布が確認可能な30枚のタイヤ仕様画像を準備

②タイヤ仕様画像の変動（明暗差）の影響因子を抽出：ここではタイヤ製品面のうねり，タイヤ回転軸角度のバラツキ等を含んだタイヤ横振れ量（タイヤとセンサー間の距離変動）が影響因子

③影響因子の物理現象を網羅する画像を準備：タイヤ横振れ量の寸法公差を網羅するように基本学習データ画像を10倍（10段階／枚）にデータ拡張(※3)（Fig. 7，8）

④生産工程の変動を織り込んだ判別モデルの構築：網羅的な学習データ（330枚）でモデル構築を効率化

※3　データ拡張
学習画像を反転や回転，輝度変化等の画像処理を用いて学習データを増やすこと

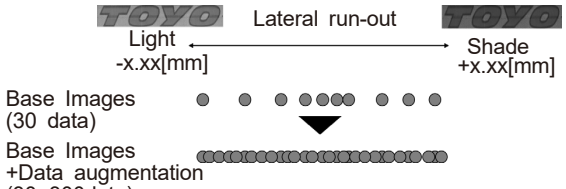


Fig. 7　Data Augmentation

Fig. 8　Data Augmentation Image

（4）適切な閾値設定による不具合品の流出防止

本取り組みでは，生産工程のさまざまな変動に対応できる自動検査システム（人のフレキシブルな状況判断の代替）を目指しているが，「2.4 完成検査自動化の考え方」に従って，判別結果（出力スコア）が少しでも曖昧な場合は全て「不明」とする適切な閾値設定を行い，不具合品の流出防止を保証する。

生産工程で取得したタイヤ画像（約2000本分）の仕様判別結果を以下（Fig. 9～11）に示すが，出力スコアの平均，標準偏差（Table 1）から，AI判別の出力スコアが95点未満であれば「不明」と判定する閾値設定とした。なお，本取り組みのタイヤ仕様判別モデルは，正しい判別（Positive）と誤判別（Negative）の出力スコアが大きく乖離しており，高い精度で仕様判別ができているといえる。

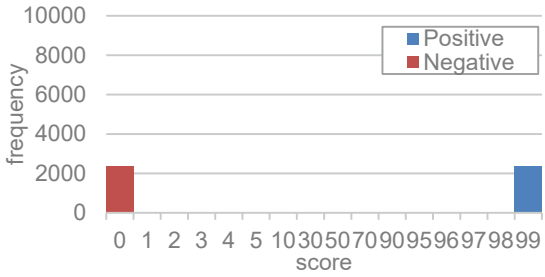


Fig. 9　Result of Manufacturer Discrimination

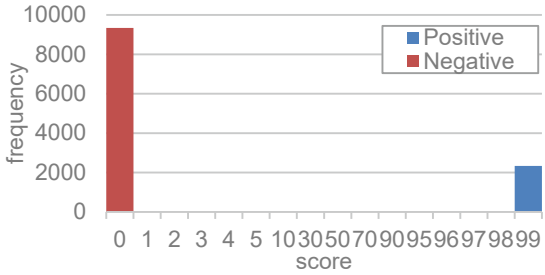


Fig. 10　Result of Series Discrimination

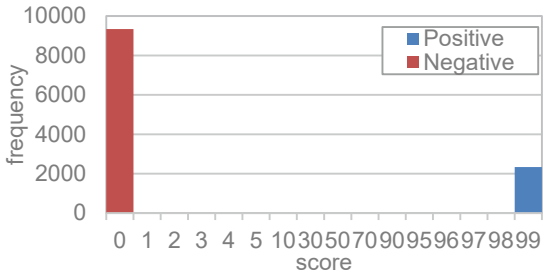


Fig. 11　Result of Size Discrimination

Table 1　Score Average and Standard Deviation

	Positive Score		Negative Score	
	Avg.	Standard deviation	Avg.	Standard deviation
Manu-facturer	99.998	0.00053	0.00112	0.00053
Series	99.999	0.00380	0.00004	0.00143
Size	99.992	0.22171	0.00196	0.10129

（5）タイヤ仕様の自動検査方法

本取り組みの自動検査システム（Fig. 12）を生産工程に設置し，以下の方法でタイヤ仕様自動検査の精度検証を行った。

①対象車両の車幅・車高に合わせて計測器を移動

②タイヤを回転させながらタイヤ全体画像を取得
③タイヤ全体画像からテンプレートマッチング(※4) でメーカー，シリーズ，タイヤサイズの画像を抽出
（1 つでも画像を抽出できない場合は「不明」と判定）
④ 対象画像を 3 つの判別モデル（メーカー，シリーズ，タイヤサイズ）にインプットし AI 判別結果（最高スコア）を出力
（1 つでも閾値未満の場合は「不明」と判定）
⑤ AI 判別仕様（最も高いスコアの仕様）を生産情報サーバーの型式仕様情報と照合（1 つでも不一致の場合は NG 判定）

※4　テンプレートマッチング
あらかじめ登録した代表的な画像との一致度から対象画像の位置を抽出する処理

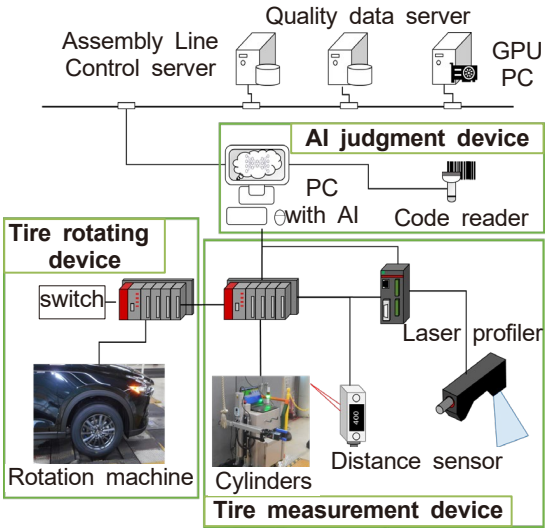


Fig. 12　Tire Inspection System

3.4　タイヤ仕様の自動検査システムの精度検証

自動検査システムの精度検証として，実証調査の実施期間中（約 2ヶ月間）の昼夜勤生産車両約 1000 台のタイヤを用いて，通常生産における判定精度の検証を行った。

判別結果（Fig. 13）と精度は以下のとおりで，判定精度の目標（流出率，誤謬率ともに 0%）を達成し，通常生産において高い判定精度であることを確認した。

【タイヤ仕様判定精度】：流出率＝0%，誤謬率 0%（0 本／2334 本），不明率 0.09%（2 本／2336 本）

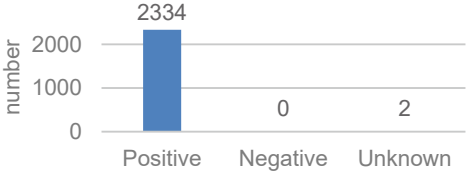


Fig. 13　Result of Normal Production

次に，生産工程で検証すべき対象物と環境の変動を網羅的に抽出するために，タイヤ仕様自動検査システムの工程 FMEA(※5) を実施した（Table 2）。

※5　工程 FMEA
Failure Mode Effect Analysis の略。システムの故障や不具合を，合理的な想定範囲において網羅的に検証する手法

Table 2　Tire Inspection Process FMEA (Sample)

Process	Function	Potential Failure Mode	Potential Effects of Failure	Potential Cause of Failure	5M+1E
ALC matching	VIN label reading and ALC matcing	VIN label reading failure	The Sensor cannot be changed. Specifications cannot be judged.	Forget to read the label	human
				label reader failure	machine
				Poor wiring	machine
		Cannot access the ALC terminal	Specifications cannot be judged.	Poor wiring	machine
				ALC terminal stop	machine
Sensor position change	Move from specification information to sensor measurement position	Cylinder does not work	The device cannot take images of manufacturer, series name, and size	Cylinder is not turned on	human
				Cylinder failure	machine
				Poor wiring (cylinder-PLC)	machine
				Channel not set	human

工程 FMEA 結果をまとめると，人（ヒューマンエラーに起因），設備（設備故障・異常に起因），対象物（車両やタイヤの変動に起因），環境（検査環境の変動に起因）の 4 つに分類される。

対象物と環境の変動に対して，以下の（1）～（4）サンプルデータを用いて生産工程での精度検証を行っていく。

なお，人と設備の変動に対しては，異常状態の確実な検出で自動停止させるシステム設計と，自動検査システムの保守管理要領等による維持管理で対応している。

（1）車幅とタイヤインチ変動のタイヤ（12 本）

多種多様のクルマに対しても判定精度を確保するため，実証検証を行った完成検査工程では生産していない車幅（1695mm ～1735mm），タイヤインチ（14 インチ～17 インチ）での車両タイヤ 12 本で検証を行った。

なお，本検査装置における車両停止位置のバラツキを考慮し各タイヤ 5 水準の停止位置（計測範囲内）で検証を実施した。

判定結果（Fig. 14）と精度は以下のとおりで，車幅，タイヤサイズの影響を受けないことを確認した。

【タイヤ仕様判定精度】：流出率＝0%，誤謬率 0%（0 本／12 本×5 水準），不明率 0%（0 本／12 本×5 水準）

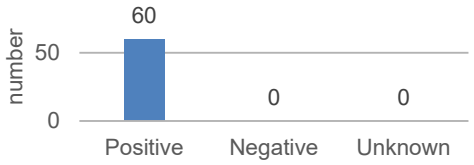


Fig. 14　Result of Other Models

（2）刻印不良のタイヤ（12 本）

装着されたタイヤの刻印にキズ等が入っている場合に，正しく判定を行うか，不明と判定するかを確認するために，キズの入った刻印タイヤでの検証を行った。

判定結果（Fig. 15）と精度は以下のとおりである。

【タイヤ仕様判定精度】：流出率＝0%，誤謬率 0%（0 本／11 本），不明率 8%（1 本／12 本）

刻印段差が無くなる激しい損傷で形状を読み取れない場合は「不明」と判定し検査員に判断を委ねることで流出防止できることを確認した。

なお，刻印の一部の欠け，擦れ，0.1mm 幅以下の線キズは，画像で形状が読み取れるため「正しく判定」する結果となった。

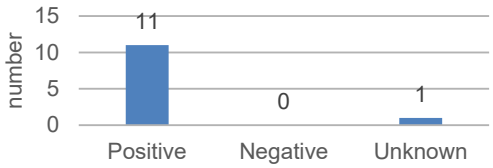


Fig. 15　Result of Defective Marking Tire

（3）環境不良のタイヤ（10 本）

生産工程での製造過程で発生する可能性がある汚れ，異物の付着，充填エア量の変動，タイヤ濡れの影響を確認するために環境不良タイヤ（Table 3）での検証を行った。

判定結果（Fig. 16）と精度は以下のとおりで，測定原理から想定したとおり，刻印を隠す異物，濡れたタイヤは不明と判定した。

【タイヤ仕様判定精度】：流出率＝0%，誤謬率 0%（0 本／10 本），不明率 40%（4 本／10 本）

Table 3　Bad Condition Sample Images

Test mode	Image	Sensor Image	Judge
Dirt			Positive
Foreign Material			Unknown
Air Pressure Drop			Positive
Wet			Unknown

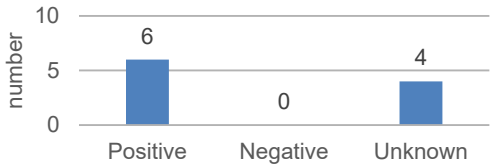


Fig. 16　Result of Bad Condition

（4）未学習のタイヤ（12 本）

新しいタイヤ仕様の設定忘れや，製造されないタイヤ仕様が装着された場合においても，検査システムは不具合品の流出防止を担保しなければならないため，未学習タイヤでの検証を行った。

判定結果（Fig. 17）と精度は以下のとおりで，全て「不明」とし検査員に判断を委ねることで不具合品を流出防止できることを確認した。

【タイヤ仕様判定精度】：流出率＝0%，誤謬率 0%（0 本／0 本），不明率 100%（12 本／12 本）

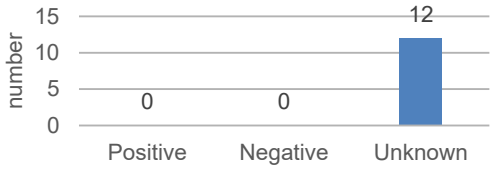


Fig. 17　Result of Unlearned Tire

4. まとめ

4.1　自動化の実現可能性

本取り組みのタイヤ仕様自動検査システムは，合理的に想定される生産工程でのさまざまな変動に対して，フレキシブルに対応し，機械と人で不具合品の確実な流出防止ができるため，自動化の実現可能性があることが分かった。

4.2　自動化に求められる要件

本取り組みから得られた自動化の導入要件は，以下のとおりである。

【システム開発時】

- 開発段階において，精緻なセンシング技術を用いて，外乱光などの変動に強い安定した画像取得を行うこと
- AI 判別モデルの構築では，学習画像の変動に影響する物理現象を網羅する学習データをあらかじめ準備すること（正しい判別と誤判別のスコア分布が，それぞれ大きく乖離していること）
- AI 判別結果（出力スコア）の分類閾値は安全方向に設定し，曖昧な判別結果は全て「不明」とする適切な閾値設定をすること

【システム導入時】

- 導入対象の生産工程において，タクトタイム内での安定した稼働を検証すること

・生産工程での精度検証は，工程 FMEA で合理的に想定される対象物と環境の変動を網羅したサンプルデータを用いて行うこと（一定のトライアル期間を設定して実施する）

なお，これら NEDO 実証結果を踏まえ国土交通省は「完成検査の自動化ガイドライン」[(2)] を策定した。今後，AI 等を活用した自動検査システムの開発・導入の促進が期待できる。

4.3　自動化による想定効果

本取り組み結果のタイヤ仕様自動検査システムの導入による想定効果は以下のとおりである。

現業工数：インライン検査作業▲ 8.4 秒／台，屈み作業（約 2000 回／日）が無くなり検査員の負荷軽減

間接工数：▲ 75H（▲ 93%）仕様追加時の画像処理ルールの設計変更に伴う間接工数増加を抑制

5. おわりに

常にお客様に満足していただける車を提供していくことがマツダの使命である。今後は，本取り組みの成果（AI を用いた自動化システム開発・導入のガイドライン）を活用して自動化を推進し，生産工程の精緻化と合理化を進めていく所存である。

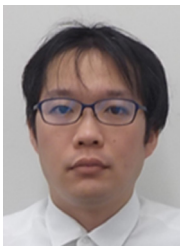
参考文献

(1) 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）：「2020 年度成果報告書　規制の精緻化に向けたデジタル技術の開発／AI を活用した自動車の完成検査の精緻化・合理化に係る調査」，報告書管理番号 20210000000327，https://seika.nedo.go.jp/pmg/PMG01C/PMG01CG01

(2) 国土交通省：「完成検査の自動化のガイドライン」，https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001393148.pdf（2021）

■著　者■

生田目 琢哉


堀元 直生

大谷 崇

岩永 健太

西野 恭弘

論文・解説

23　デジタル動作解析による技能伝承システムの開発と実用化

Development and Realization of System for Passing Down Skills and Techniques on Digital Motion Analysis

佐伯　千春 *1　久保　祐貴 *2　須賀　実 *3
Chiharu Saeki　Yuhki Kubo　Minoru Suga
江草　秀幸 *4　大田　敦史 *5
Hideyuki Egusa　Atsushi Ohta

要　約

「魂動デザイン」は随所にデザイナーの想いが込められている。マツダの生産技術領域では，魂動デザインを高い精度で量産車にて実現するため，Mass Craftsmanship（職人技の量産化）に取り組んでいる。その中で，金型製作部門は，匠と呼ばれる熟練技能者の動作をモーションキャプチャーで計測し，匠技の見える化に取り組んでいる。長年掛けて培われる匠技の勘・コツを定量化することで，技能者本人と匠の技能を定量的に比較することができ，技能の短期育成を実現する。これまで金型製作の重要な技能の 1 つであるグラインダー研削技能を対象に，デジタル動作解析による技能伝承システムを開発し，技能育成期間の短期化を実現した。本稿では，同様に重要な技能である肉盛り溶接技能について技能伝承システムを開発した事例を紹介する。

Abstract

Mazda designers' aspiration appears everywhere throughout the "KODO Design". Mazda's Production Engineering Division is proceeding with "Mass Craftsmanship" for realization of the "KODO Design" with high precision in production vehicles. By measuring the motions of craftsmen called 'Takumi' with a motion capture system, Mazda's Tool & Die Production Department works on visualization of craftsmen's skills and techniques. Quantification of craftsman's skills and techniques, which have been cultivated over the years, enables quantitative comparison of those between a trainee and craftsman, realizing short-term nurturing of technician. We realized shortening of the training term for grinder skill which is one of the important skill for die production by using a new system for passing down skills and techniques. This article introduces a case of the system used for passing down welding skills which is also important for die production.

Key words : Human engineering, Production manufacture, Common infrastructure, Burden, Physical burden, Musculoskeletal system, Quality control, Welding, Weld overlay, Engineering training

1. はじめに

マツダは，カーライフを通じて人生の輝きを人々に提供することをコーポレートビジョンに掲げている。それを実現するための提供価値の一つに「魂動デザイン」がある（Fig. 1）。魂動デザインには，デザイナーの想いが随所に込められており，昨今はアートとして深化している。マツダの生産技術領域の使命は，魂動デザインを高い精度で量産車にて実現することであり，職人技による造り込み（希少性・感動）と生産性の高さ（高速・高精度）を高次元で両立させる Mass Craftsmanship（職人技の量産化）に取り組んでいる。その中で，マツダの金型製作部門も，お客様の心を揺さぶる美を追求することにこだわり続け，マザーツールである金型の製作及び技術開発に日々取り組んでいる。金型製作は高度な技能と技術の融合であり，双方の進化によって魂動デザインを具現化している。一方で，人から人へ伝承される高度な金型仕上げ技能を習得するためには長い歳月を要しており，深化する魂動デザインを具現化し続けていくためには，技能を高い効率で伝承していく必要がある。

本稿では，金型製作の匠技を定量的に解明し，短期での技能育成を可能とする技能伝承システムの開発と実用

*1〜5　ツーリング製作部
Tool & Die Production Dept.

Fig. 1　KODO Design

化について取り組んだ事例を紹介する。

2. 技能伝承の目指す姿と課題

マツダの金型製作部門の目指す姿は，技能を定量化し目標と課題を認知できる技能伝承と，自己成長を実感し自信と誇りをもって研鑽する働き甲斐のある職場づくりの実現である。目指す姿を実現するため，匠級技能者の育成期間の目標を従来の 20 年から 5 年とした（Fig. 2）。金型製作において「技能」は，「人の動き」となって表現される。そのため，身体の動きを分析することで，匠技に潜む勘・コツを解明できると考えた。よって，匠技を短期間で伝承するためには，「動きを全て見える化」し，「重要ポイントを特定」，それを「正しく伝え，習得する」ことが必要であると考え，以下 3 項目を重点課題とした。

①技能の見える化
②技能のメカニズム解明
③技能訓練の定量化

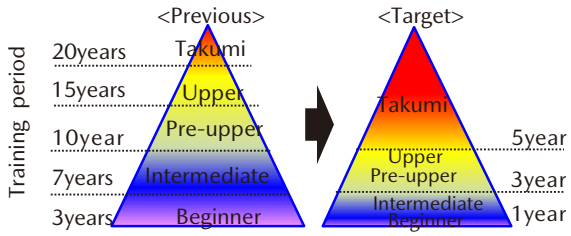


Fig. 2　Target of Takumi Development

3. 技能の見える化

3.1　対象技能

金型製作部門では，数多くある金型製作の技能を体系化しており，その中で長い育成期間を要する技能を選定し技能伝承システムを開発している。これまで，金型仕上げ作業の基礎として重要なグラインダー研削技能において，育成期間の短期化を実現した[(1)〜(4)]。本稿では，新たに「肉盛り溶接技能」を対象に取り組んだ事例を紹介する。肉盛り溶接技能は，グラインダー研削技能に次いで重要な基礎技能であり，金型にとって重要な意匠面の補修などに活用される。

3.2　システム概要

本稿で紹介する技能伝承システムは，技能の定量的な計測・評価・訓練が可能である。システムの概要を Fig. 3 に示す。身体動作の計測は光学式モーションキャプチャーを採用し，4m×4m×2m の範囲において，8 台のカメラで身体に取り付けた反射マーカーを計測し，三次元座標や速度などの情報を取得した。反射マーカーは技能者の身体に 41 個，ツールに 3 個取り付けた。更に，作業中の筋活動量は，モーションキャプチャーで計測した身体動作情報を基に，筋骨格モデリングシミュレーションを用いて推定した。これらの情報を分析することで，技能を見える化し，技能メカニズムを定量的に解明した。

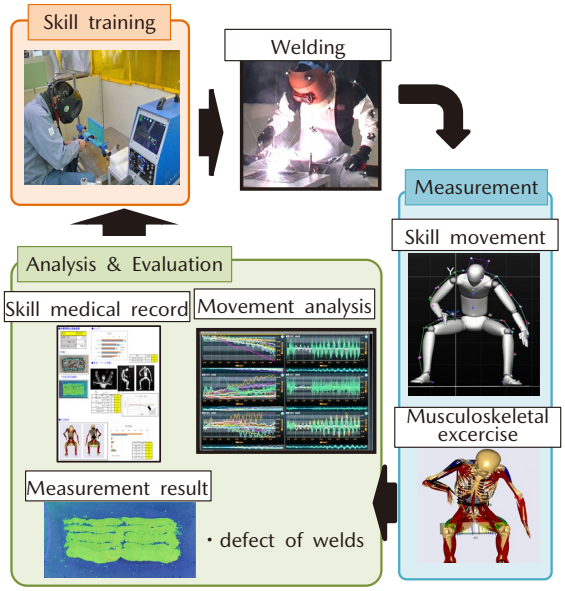


Fig. 3　System for Passing Down Skills and Techniques on Digital Motion Analysis

4. 技能のメカニズム解明

4.1　技能階級の定義

現在，マツダの金型製作部門では，技能階級を 5 階級（匠級，上級，準上級，中級，初級）に区分し設定している。従来，初級から上級までは国家技能検定の取得や経験年数によって定めており，匠級技能者は 20 年以上の業務経験を持ち，海外での業務や指導・育成の経験がある「誰もが認める技能の優れた人」という周囲の官能評価を基に設定していた。技能伝承システムでは，これまでの官能評価ではなく，定量的な階級評価基準を新たに設定し，匠級技能者の基準を明確にした後，技能者の計測データを分析し，技能メカニズムを解明した。その評価に用いるテストピースの仕様を Fig. 4 に示す。評価は，球状黒鉛鋳鉄品（FCD600）の母材への多層盛りとし，実際の作業状態を考慮し母材を 45°の傾きをもつ治具に設置した。溶接種類は金型製作部門で使用頻度の高いマグ溶接とし，溶接条件は固定とした。

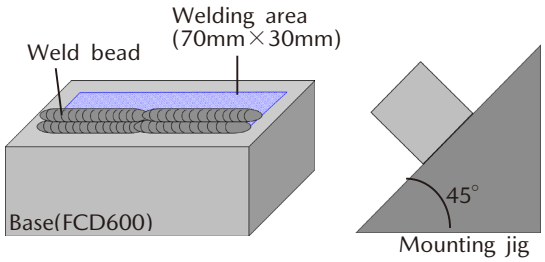


Fig. 4　Test Piece of Examination

評価する溶接品質は，溶け込み不良，巣，欠肉を対象とした。以降，まとめて溶接欠陥と呼称する。これらの溶接欠陥は，肉盛り部分をフライスで切削除去した後，その面を三次元測定機で測定し，溶接指示範囲内で溶接欠陥が占めている面積を算出した。その平均値と標準偏差を基に技能階級の閾値を設定した（Table 1）。

Table 1　Area of Defect of Welds in Each Rank

Class	Area of defect of welds [mm^2]
Class5：Takumi	＜15
Class4：Upper	＜30
Class3：Pre-upper	＜60
Class2：Intermediate	＜130
Class1：Beginner	130≧

4.2　技能のメカニズム解明手法

技能伝承システムでは，身体動作及び筋骨格に関する情報を取得できる。身体動作は，モーションキャプチャーにより，身体とツールに取り付けた 44 個のマーカーの位置情報に加え，19 個の身体部位（頭・首・胸・左右肩・左右上腕・左右前腕・左右手・腰・尻・左右腸骨・左右膝・左右足）及びツールの重心位置情報を取得できる。筋骨格は，筋骨格モデリングシミュレーションにより，筋活動量や腰椎間反力などの身体負荷に関わる情報を取得できる。これらはモーションキャプチャーで得た身体動作情報を基に算出され，筋活動量は全身 921 本の筋肉について算出される。筋活動量は，最大可能筋力 F_{max}[N] に対する筋力 F[N] の割合であり，単位は [%] で表される。

技能のメカニズム解明では，これらの情報から匠技の特徴を抽出した。その手法は，多変量解析の一つである主成分分析を活用した。主成分分析は，多数のデータ（以下，説明変数）を集約することで特徴を抽出する手法である。今回対象とした溶接技能の動作は外的変化が少なく，モーションキャプチャーから得られる外見の動きだけでは技能の特徴を抽出しきれないと考えた。そのため，説明変数に筋骨格モデリングシミュレーションから得られる筋活動量の情報を加え，身体内部からも技能の特徴を抽出し，Table 2 に示す計 73 種の説明変数に対し，主成分分析を行った。

Table 2　Explanation Variable

	Details	Quantity
Center of gtravity of body	Center of gravity of 19 portions of each body Displacement, Velocity, Acceleration of XYZ axes	57
Center of gravity of tool	Displacement, Velocity, Acceleration of XYZ axes	3
Amount of muscle activity	13 portions of each body	13
	Total:	73

匠級技能者 1 名，上級技能者 2 名に対し主成分分析を行い，累積寄与率が 60%以上となる第 5 主成分までのデータで評価を行った。ここで，技能者個人に特化した特徴でなく，上位階級に共通する特徴を洗い出すため，上位階級 3 名の主成分分析結果を合成した。また，主成分分析では，各主成分に寄与度の高い説明変数を得ることができるため，上位 10 個の説明変数を各主成分の重要管理項目とした。次に，この重要管理項目を基に，第 1 主成分から第 5 主成分の特徴づけを行い，第 1 主成分から順に，「ツール把持部変位」「体幹速度」「接地部位筋力」「体幹筋力」「ツール操作筋力」とした。この特徴づけした 5 個の主成分を匠技の重要因子とし，主成分スコアを計算した（Fig. 5）。主成分スコアは，上位階級の方が高い傾向になっており，肉盛り溶接技能の特徴量を 5 つの主成分で定量的に表現できていると考えた。この主成分スコアは，訓練者と匠級技能者を比較し，評価に活用した。

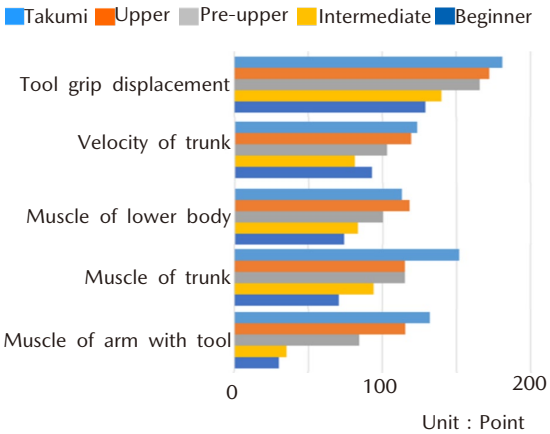


Fig. 5　Principal Component Scores

4.3　匠技の特徴

主成分分析から得た重要管理項目について，「ツール動作」と「作業安定性」の視点から匠級技能者の特徴を明らかにした。匠級技能者と初級技能者の比較事例を紹介する。

（1）ツール動作

メカニズム解明で抽出した匠技の特徴の 1 つに「ツール把持部変位」がある。そこで，Fig. 6 に示す（i）ツール移動速度，（ii）ツール移動角，（iii）ツール動作角，（iv）ツール先端の母材に対する変位，を始めとするツール動作に着目した。特に，匠級技能者と初級技能者には，「ツール移動速度」や「ツール先端の母材に対する変位」に差があり，これらが溶接ビードの形状や重なり具合へ影響した結果，溶け込み不良などの溶接欠陥に差が出たと考えた。このように，メカニズム解明で抽出した特徴を基に，ツール動作における技能向上課題が明らかとなった。

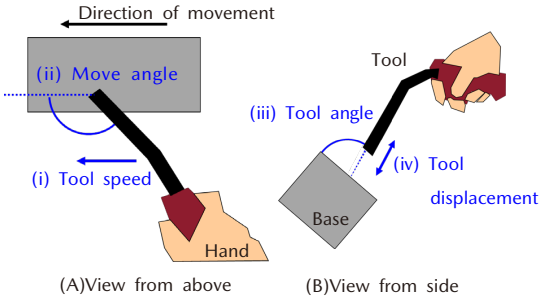


Fig. 6　4 Items of Tool Movement

（2）作業安定性

作業安定性を向上させるための勘・コツは，筋骨格動作に潜むと考えた。匠級技能者と初級技能者の筋活動量の比較を Fig. 7 に示す。匠級技能者は初級技能者と比べて，体幹の筋活動量が大きく，ツール持ち手である右手の筋活動量は小さい，という特徴が見えた。また，Table 3 に（1）ツール動作で着目した 4 項目について匠級技能者と初級技能者の標準偏差の比較を示す。Table 3 に示すように匠級技能者はツール移動速度やツール先端の母材に対する変位の標準偏差が小さく，一定の速度と距離を保っていることが分かった。このことから，匠級技能者は体幹を効率よく使うことで身体をコントロールし，右手の筋力の負荷が小さくなる筋骨格動作により，作業安定性を維持していると考えた。また，筋骨格動作の違いは，モーションキャプチャーから得られる腕や足の位置などの作業姿勢に現れていることが判明した。よって，作業安定性を維持する筋骨格動作は，姿勢改善により訓練することとした。

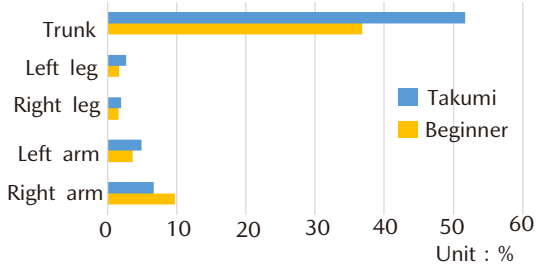


Fig. 7　Comparison of Amount of Muscle Activity

Table 3　Comparison of Standard Division of Tool Movement

	Tool Movement	Takumi	Beginner
i	Tool speed [mm/s]	5.11	8.90
ii	Move angle [deg]	0.50	0.52
iii	Tool angle [deg]	0.12	0.36
iv	Tool displacement [mm]	0.43	1.90

5. 技能訓練の定量化

5.1　技能カルテの概要

技能メカニズムの解明から得た一連の情報を基に，技能者個人の技能カルテを作成した。技能カルテの例を Fig. 8 に示す。

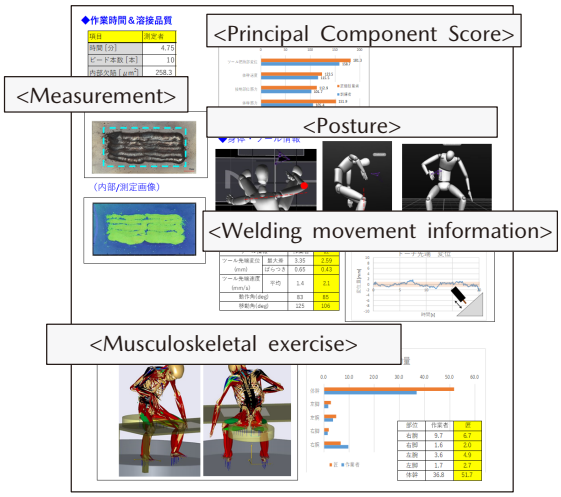


Fig. 8　Example of Skill Medical Record

この技能カルテには，技能メカニズムの解明で得た重要管理項目を基に，技能者が理解し技能動作を改善しやすい情報を記載した。また，技能者と匠級技能者の値を並べることで技能を定量的に比較・評価でき，技能向上課題が一目で分かるようにした。この技能カルテを訓練の前後に作成することで，技能者及び指導者が技能を定量的に把握でき成長に向けた的確な訓練を可能とした。更に，技能の変化を視覚的にとらえることができるため，技能者本人のモチベーション向上にもつながる。

5.2　実機及びバーチャル訓練

技能カルテを基に訓練を行った。技能者は，技能カルテで技能向上課題を把握した後，ツール動作や筋骨格情報が匠級技能者の値に近づくように訓練した。訓練は 2 種類を実施した。1 つ目は，実機を使った訓練である。金型製作の現場と同様の機器を使い，肉盛り溶接を行う。実機訓練では溶接の実現象と技能動作の感覚をすり合わせながら技能を向上できる。2 つ目は，バーチャル機器

を使った訓練である。バーチャル訓練は，拡張現実（Augmented Reality：AR）を活用した疑似訓練である。Fig. 9 にバーチャル訓練の様子を示す。訓練では技能者が自身の動作をリアルタイムに確認し即時補正していくことが重要である。バーチャル訓練では，頭部に装着する機器の画面内で，自身のツール動作の情報を確認しながら訓練できる。そのため，技能者は自分の動作を即時確認し修正して技能を身に付けることができる。また，バーチャル機器は，ツール移動速度やツール角度など溶接で重要とする項目を基に，溶接動作を評価することができる。メカニズム解明で明らかにした重要管理項目と匠級技能者の値を基に，評価の閾値を独自に設定し，匠級技能者育成コースを作成し運用した。更に，バーチャル訓練では，溶接材やガスが不要であり，熱や光，煙，スパッタが発生しないため，従来の実機訓練よりも低コストでより安全性な環境下での技能育成が可能である。より効果的な育成を行うために，実機訓練とバーチャル訓練の長所を組み合わせた訓練を実施している。

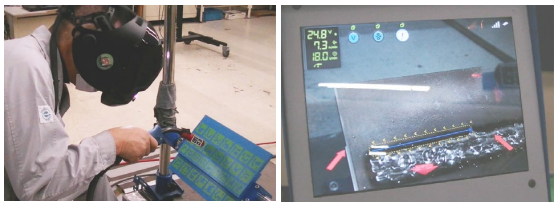


Fig. 9　Virtual Welding Training

6. 技能育成の効果

技能者 1 人につき，1 回 2H×4 回の訓練を行い，訓練前後での技能階級の変化を確認した。8 名訓練した結果として，訓練前後での階級分布の変化を Fig. 10 に示す。8 名中 5 名の技能階級が昇格した。また，8 名中 7 名は溶接欠陥が改善し，技能の向上を確認した。

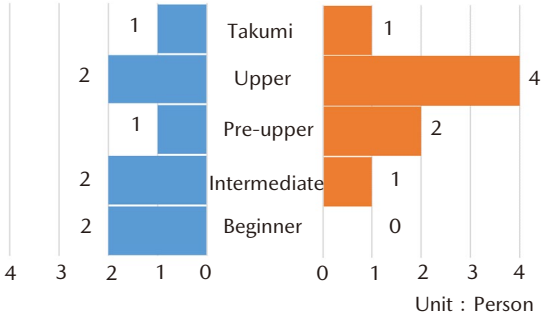


Fig. 10　Rank Change Before and After Instruction

初級から準上級へ昇格した事例を Table 4 及び Table 5 に示す。Table 4 は溶接欠陥の写真と溶接欠陥の面積を示し，写真内の四角枠は溶接指示範囲を示す。Table 5 には，訓練前後でのツール動作の標準偏差を示す。Table 5 より，訓練後は特にツール移動速度とツール先端の母材に対する変位の標準偏差が小さくなり，作業安定性が向上した。これらの各項目の改善により，溶接欠陥が減少し，溶接品質の向上につながった。また，従来の階級基準であれば 10 年掛かる準上級に，経験年数 2 年で到達できた。これにより，技能者が自己成長を実感し自信と誇りをもって研鑽する働き甲斐のある職場づくりを実現した。更に，短時間訓練での技能向上効果により対面での指導時間を削減でき，新型コロナウイルス禍での技能伝承の在り方を変え，働き方改革にもつながった。今後は，引き続き技能者の技能訓練を行っていく中で，より効果的かつ高効率に技能を向上させる指導方法を検討していく。

Table 4　Comparison of Before and After of Defect of Welds

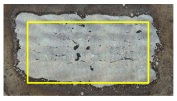
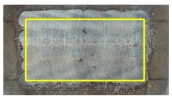
	Before	After
View of Defect of welds		
Detect of welds [mm^2]	140.7	49.5

Table 5　Comparison of Before and After of Tool Movement

Tool Movement	Before	After
Tool speed [mm/s]	6.31	3.84
Move angle [deg]	0.40	0.35
Tool angle [deg]	0.87	0.22
Tool displacement [mm]	1.92	0.81

7. おわりに

本取り組みによって，肉盛り溶接技能の匠級技能者を早期育成するシステムを開発した。今後も「魂動デザイン」の忠実な再現のため，金型製作における Mass Craftsmanship に取り組んでいく。そして，魂動デザインを通して，お客様の人生に輝きを提供するクルマづくりに取り組み続けていく。

参考文献

(1) 久保祐貴：「魂動デザイン」を支える技能者の育成，マツダ技報，No.36，pp.165-170（2019）
(2) 久保祐貴：デジタル動作解析による匠開発システムの構築，型技術，7 月号，pp.74-75（2020）
(3) 佐伯千春：仕上げ技能における匠の動作および筋活動分析による技能伝承システム（TDS-DMA）の開発と実用化，精密工学会誌，87 巻，2 号，pp.169-172（2021）
(4) 久保祐貴：金型仕上げ技能における匠の動作及び筋

活動 分析による技能伝承システム（TDS-DMA）の開発と実用化，型技術者会議講演論文集，第 35 回，pp.21-25（2021）

■著　者■

佐伯 千春

久保 祐貴

須賀 実

江草 秀幸

大田 敦史

論文・解説

24　塗装部の耐食性迅速評価技術のモデルベース研究開発

Model-based Research and Development of Accelerated Evaluation Techniques for Corrosion Resistance of Painted Parts

浅田　照朗 *1　佐々木　將展 *2　江﨑　達哉 *3
Teruaki Asada　Katsunobu Sasaki　Tatsuya Ezaki
重永　勉 *4　髙見　明秀 *5
Tsutomu Shigenaga　Akihide Takami

要　約

自動車の防錆品質は，お客様の安全・安心に直結し非常に重要である。自動車の腐食対策を高精度かつ高効率に実現する技術は，品質の迅速な造り込みに不可欠で，商品価値向上に寄与する。従来の実腐食試験をベースとした防錆技術開発では，市場の代表的な腐食環境に基づき，腐食を促進することで市場 15 年相当のダメージを 2〜4ヶ月程度（業界標準）で与え，発生した錆の程度を性能の判断指標としてきた。従来方法では時間が掛かる上に，さまざまな状態の錆を目視で評価するため，結果は定性的であった。この課題を克服すべく，防錆塗膜の性能発現メカニズムに基づいたモデルベース研究開発手法を活用し，塗装部の耐食性を電気化学的に迅速に定量評価する技術を開発した。本報では，この耐食性の迅速評価技術と，その効果について説明する。また，技術適用先として，新規防錆技術の開発へ適用した事例を紹介する。

Abstract

The rust prevention quality in vehicles is extremely important for the safety and security of customers. Technology that realizes high-precision and high-efficiency measures against automobile corrosion is essential for quality innovation. In addition, it greatly contributes to the improvement of commercial value. In the development of rust prevention technology based on the conventional actual corrosion test, the typical corrosion environment of the market is reproduced in the test chamber, and the damage equivalent to 15 years in the market is given in about 2 to 4 months, and then the degree of rust generated is used as a performance judgment index. The test requires a long period, and the result is qualitative because the rust in various states are visually evaluated. In order to overcome the above-mentioned challenge, electrochemical accelerated-evaluation techniques for corrosion resistance have been developed, utilizing a model-based research and development method based on the performance expression mechanism of the anti-corrosion coating. Electrochemical accelerated evaluation techniques for corrosion resistance have been developed. In this technical report, the evaluation techniques for corrosion resistance and its effects are discussed. In addition, scope of utilization of the techniques and the examples of application to the development of new rust prevention technology are introduced.

Key words : Materials, Common infrastructure, Paint, Rust prevention, Measurement/Diagnosis/Evaluation
Coating, E-coat, Zinc phosphate

1. はじめに

持続可能な社会と産業の発展を実現するとともに，人が安全・安心で豊かな生活を営むためには，強靭な社会基盤が重要である。近年，この社会基盤の老朽化が顕在化し始めている。社会インフラの効率的な維持管理や耐久性向上は，現代社会に課せられた課題のひとつである。日本国内における腐食対策費は，数々の防錆手段の中でも塗装の割合が 6 割以上と最も高く，総額で年間約 2.3 兆円を占める(1)。自動車も同様に塗装が主要な防錆手段

*1〜5　技術研究所
Technical Research Center

である。自動車の防錆品質は，お客様の安全・安心に直結する極めて重要な品質である。この自動車の腐食対策を高精度，高効率に実現する技術は，品質向上に必須で商品価値にも直結する。例えば，今後急速に進むと想定される電動化やそれに伴う軽量化対応で新規部品や材料の防錆品質を迅速に造り込む上でも不可欠である。従来の防錆技術開発では，市場の代表的な腐食環境に基づき，腐食を促進することで，市場 15 年相当のダメージを 2〜4ヶ月程度（業界標準）で与え，腐食（錆）の程度を性能の判断指標としてきた。リン酸亜鉛化成処理とエポキシ系電着塗装から成る塗装部の防錆性能は，材料，工法，生産条件など影響する因子が多岐にわたり複雑である。従来，これら複雑な影響因子の制御を実腐食試験に基づき行っていたため，防錆品質の造り込みには数年を要し，評価も最悪条件の代表的な組み合わせに限定された。車両の構造設計に防錆仕様を反映して高い防錆品質を有する車両を高効率に実現するためには，塗装部の耐食性を数日以内に定量できる技術が理想である。弊社では，この技術開発において，防錆塗膜の性能発現メカニズムに基づいたモデルベース研究開発手法を活用し，塗装部の耐食性を電気化学的に迅速に定量評価する技術を実用化した。本報では，この耐食性の迅速評価技術とその効果をさまざまな塗装試験片を用いて複数の腐食評価法を比較検討することで，従来法との相関性や腐食促進性の違いを考察するとともに，新規防錆技術の開発へ適用した場合についても言及する。

2. 実験方法

2.1　試験片の調製

塗装部試験片としては，非めっき鋼板（溶接の有無）にリン酸亜鉛化成処理とエポキシ系電着塗装（防錆塗膜）を施し，耐食性への影響が考えられる溶接酸化膜の有無，化成処理の条件，電着塗料の種類と塗装条件を変化させて試験片を作製した（Table1 参照）。

Table1　Specification of Test Pieces

Type of steel		A	B		
Welding		N/A	MAG welding		
Type of descaling		N/A	N/A	C	D
Zinc phosphate	Type	E	F		
	Time	10-120s	120s		
E-coat	Type	G	H	I	J
	Baking	413K×900s -423K×1,200s	423K× 1,200s		
	Thickness	2-10μm	30μm		

2.2　実腐食試験，及び耐食性の迅速評価方法

（1）複合サイクル腐食試験（CCT）

塩水噴霧 6 時間（温度 308K，湿度 100%），乾燥 3 時間（温度 323K，湿度 30%），湿潤 14 時間（温度 323K，湿度 98%），送風 1 時間（温度 296K，湿度 50%）を 1 サイクルとした繰り返しモードで試験を実施した。

（2）湿潤環境試験

電着塗装板に素地に達するスクラッチ傷を付け，スクラッチ傷部に模擬泥としてカオリン（$Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$）と Na^+，Ca^{2+}，Cl^-，SO_4^{2-} イオンを含有する混合液（pH 7）を付着させ，湿潤環境（温度 323K，湿度 98%）で試験を実施した。

（3）耐食性の迅速評価

塗装部の腐食は，腐食因子が防錆塗膜を透過して素地金属に到達することで開始する。その後，素地金属の溶出に伴い発生した電子を消費する電気化学反応で塗膜腐食は進展する。このことから塗装部の防錆機能は，①腐食抑制期間（塗膜が腐食因子を遮断して錆が抑制される期間）と②腐食進展速度（塗膜下で腐食反応が起きて錆が進展する速度）に分けて整理できると考えられる（Fig. 1 参照）。この双方の機能を個別に定量する試験と評価方法について次に示す。この試験と評価には，弊社で開発した装置を使用した（Fig. 2 参照）。

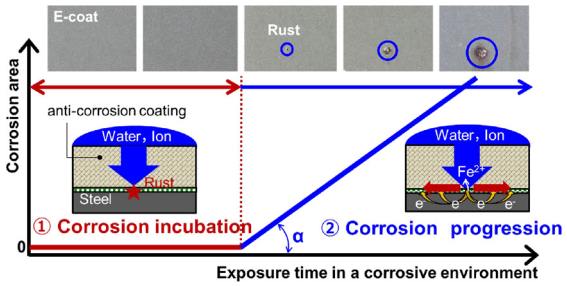


Fig. 1　Functions of Anti-corrosion Coating

Fig. 2　Appearance of Evaluation Equipment

a. 腐食抑制期間の迅速評価

塗装面上に電解質溶液（5wt% 塩水）を保ちながら，塗装金属材の鋼板と塗膜表面との間に時間に対して徐々に増大する電圧を印加して（1V/s），水とイオン物質を強制的に塗膜に透過させ，通電するときの電圧値（以降，絶縁電圧もしくは電圧値と記載）に基づいて耐食性を評価した（Fig. 3 参照）。この電圧値と従来の実腐食試験で塗装金属材に錆が出始めるまでの期間（腐食抑制期間）との関係をあらかじめ求めておくことで，塗装金属材の絶

縁電圧から腐食抑制期間を求めることができる[(2)]。複合サイクル腐食試験では，サイクル数（X 軸）と腐食発生面積率（Y 軸）との関係において，腐食発生率 1～5%の範囲における近似式と X 軸の交点を腐食抑制期間と定義した。

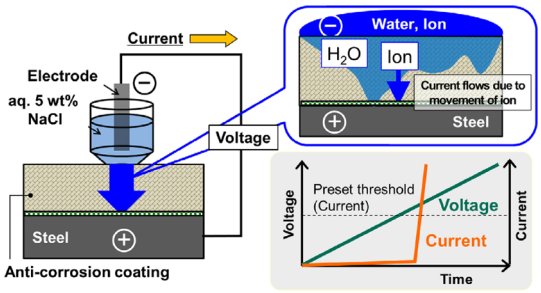


Fig. 3　Evaluation Method of Corrosion Incubation

b. 腐食進展速度の迅速評価

塗装部にポンチもしくは小型カッター（エヌティー(株)製，小型 A 刃（BA-160），刃幅 0.38mm）を用いて素地に達する人工傷を付与した。これにより，塗膜による腐食抑制期間をあらかじめ除いて，腐食進展速度を評価した。ポンチによる点傷からの膨れ径 A1（m），または，カッター刃で付けた線傷からの最大膨れ幅 A2（m）を電流印加時間 t（s）で除したものを腐食進展速度（m/s）と定義した。塗装面上に電解質として，カオリンと Na^+，Ca^{2+}，Cl^-，SO_4^{2-}イオンを含有する混合液（pH 7）を保持した。電解質液の温度は試験片をヒーターにより加熱して 338～348K に制御した。また，塗膜に十分に電解質液を浸透させるための時間として試験片をヒーターで加熱して 1,800s 保持した。その後，アノードとカソード間に 1mA の定電流を 1,800～3,600s 印加し，カソード側に発生した塗膜膨れから，腐食進展速度を試算した（Fig. 4 参照）。

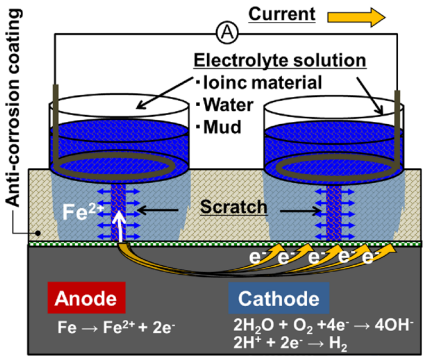


Fig. 4　Evaluation Method of Corrosion Progression

3. 実験結果と考察

3.1　腐食抑制期間の迅速評価

塗装部の防錆機能は，①腐食抑制期間と②腐食進展速度に分けて整理できることは前述した。ここでは，①腐食抑制期間の影響因子について検討した。塗装部の腐食抑制モデルを示す（Fig. 5 参照）。自動車用の電着塗料は，主にエポキシ樹脂により構成される。膜厚が厚く，膜質がよいものほど，腐食因子である水やイオン物質の遮断性が高く，錆の発生が遅いと考えられる。膜質とは，ガスピンホールなどの塗膜欠陥がなく，樹脂同士が密に架橋を形成したものがよいと考えられる。一般に，樹脂の架橋（硬化反応）の程度を示す指標として，ゲル分率（%）が用いられるが，このゲル分率は，加熱によって樹脂の架橋（硬化）反応を進行させる自動車用の電着塗料において，樹脂の熱劣化が起こらない加熱温度範囲（413～463K 程度）であれば，加熱温度が高く，加熱時間が長いほど高くなる（Fig. 5 参照）。本検討では，膜厚や膜質（樹脂の硬化度）を塗装条件によって，それぞれ 2～10μm，84.8～93.0%に制御した。膜厚と絶縁電圧，加熱条件と絶縁電圧の関係を示した（Fig. 6 参照）。本検討の範囲内では同一膜厚（10μm）において，加熱温度が高く，加熱時間が長いほど絶縁電圧は高くなった。また，加熱条件が同一（413K×1,200s）の場合には，膜厚が厚いほど絶縁電圧は高くなった。複合サイクル腐食試験で 40 日経過後の試験片外観を合わせて示した。絶縁電圧が高い試験片ほど腐食が抑制されていることがわかる。これは，加熱温度が高く，時間が長くなったことで，樹脂の架橋が進み水やイオン物質の遮断性が向上したこと，膜厚の増加でも同様に遮断性が向上したことによると考えられ，想定とおりの結果が得られた。

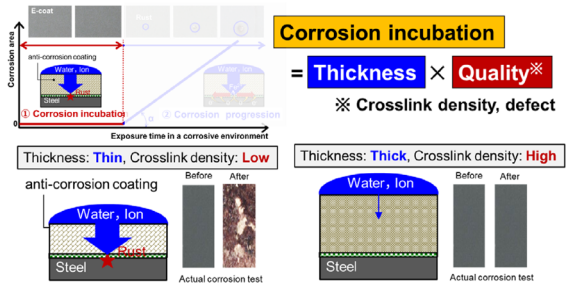


Fig. 5　Corrosion Incubation Model

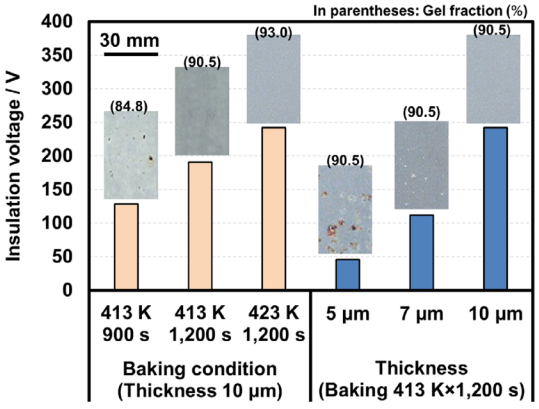


Fig. 6　Relationship between Insulation Voltage and Baking Conditions, Film Thickness, and Appearance of Test Piece after 40 Cycles in CCT Test, Steel: A, Zinc Phosphate: E (Time: 120s), E-coat: G (Baking: 413K×900s-413K×1,200s, Thickness: 5-10μm).

次に，実腐食試験における発錆サイクル数と絶縁電圧の関係を示す（Fig. 7 参照）。今回の試験片の作製条件において，膜厚が厚く，樹脂の熱劣化が起こらない加熱温度範囲であれば，加熱温度が高く，加熱時間が長い試験片ほど発錆までの期間は遅くなった。塗膜の腐食因子遮断性を示す絶縁電圧は，錆の発生が遅い試験片で高い傾向を示した。この絶縁電圧と実腐食試験における錆発生までの期間には高い相関（R^2=0.92）が認められた。このことは，本評価法で電着塗装の膜厚と膜質が影響する腐食抑制期間を精度良く測定できたことを示している。本評価法では 1 測定当たり，例えば絶縁電圧 300V（本研究で実施した複合サイクル腐食試験で 3ヶ月経過後に発錆する電着塗装）のものであれば，約 5 分で電着塗装部の腐食抑制期間を評価することができる。以上のことから，本評価法により腐食抑制期間を定量的に短時間で評価できることが分かった。

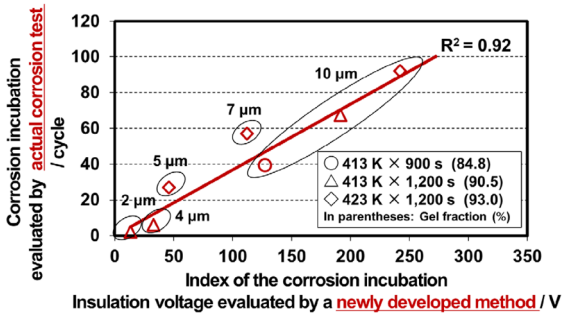


Fig. 7　Relationship between Cycle Number of Rust Formation at CCT Test and Insulation Voltage Evaluated by Newly Developed Method, Steel: A, Zinc Phosphate: E (Time: 120s), E-coat: G.

3.2　腐食進展速度の迅速評価

腐食進展モデルを示す（Fig. 8 参照）。腐食因子が素地金属に到達した後に素地金属が溶出（アノード反応）に伴い発生した電子を消費する電気化学反応（カソード反応）で塗膜下の腐食は進展する。【図中（A)】素地金属の溶出し易さは主に鋼板種に依存し，不働態被膜の形成や腐食生成物の形成等がその影響因子となる。【図中（B)】電着塗膜の膜質は塗料の種類や塗装条件に依存し，塗膜の保水量に影響を与える。保水しやすいものほど塗膜下に水やイオン物質，溶存酸素が供給され易いと考えられる。【図中（C)】電子を消費するカソード反応の起こり易さは，反応サイトの量（化成被覆率）などに依存し，素地金属の露出が多いほど腐食電流の遮断性能は劣る。このカソード反応は，塗膜下のアルカリ化を引き起こす。化成結晶の耐アルカリ性は，結晶構造などに依存することが報告されている[3-5]。化成結晶は，主に Hopite（$Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$）と Phosphophyllite（$Zn_2Fe(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$）があり，後者の方が耐アルカリ性に優れる。また，電着塗膜と化成被膜とのアンカー効果による付着力は，化成結晶の形状に依存し，塗膜との接触面積が大きいと高いと考えられる。このように腐食進展速度は鋼板と化成，電着の種類や塗装条件に依存し，それらに影響を及ぼす因子は多岐に亘る。

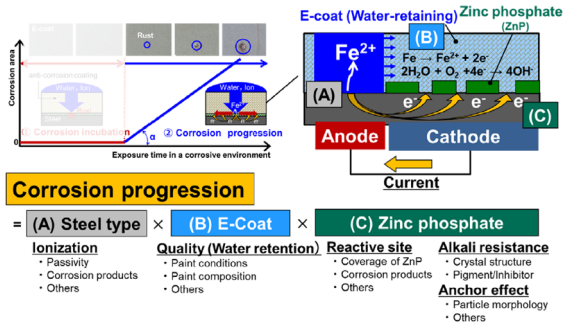


Fig. 8　Corrosion Progression Model

実験的にカソード反応サイトの量（化成被覆率）と結晶形状を処理条件で変化させた試験片を用いて，腐食進展速度を定量評価した（Fig. 9 参照）。腐食環境に晒して電流を印加した時間に対して，発生した塗膜膨れの径が大きくなる傾向が認められ，想定とおり化成被覆率が低く，結晶の形状的に塗膜との接触面積が小さい付着力の低いと考えられる試験片でグラフの傾きが大きく，腐食進展速度が速いことが認められた。

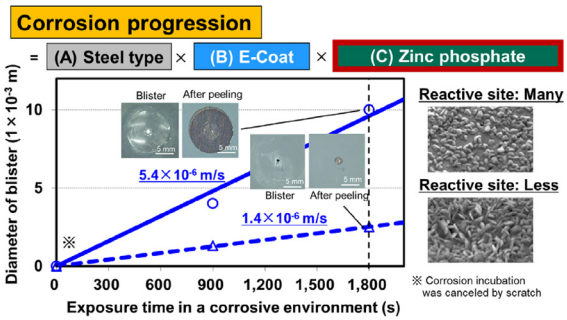


Fig. 9　Differences in Corrosion Progression Evaluated by Newly Developed Method Due to Changes in Coating Specifications of Zinc Phosphate, Steel: A, Zinc Phosphate: E (Time: 10 and 90s), E-coat: G (Baking: 413K×1,200s, Thickness: 10μm).

続いて，電着膜質の腐食進展速度に対する影響を明確にするために，化成処理の条件に加えて，電着の塗装条件を変化させた試験片を用いて同様の評価を実施した。試験片の調整条件は，リン酸亜鉛化成処理の時間を 10s～120s，電着塗料の加熱条件を 413K×900s～423K×1,200s とした。また，実腐食試験（湿潤環境試験）に基づき評価した腐食進展速度と本技術で評価した腐食速度との関係を比較した（Fig. 10 参照）。電着塗装条件について，今回の試験片の作製条件において，樹脂の熱劣化が起こらない加熱温度範囲であれば，加熱温度が高く，加熱時間が長い試験片ほど腐食進展速度が遅い傾向が認

められた。化成処理の条件については，同様の電着塗装条件であれば，先に確認したのと同様に処理時間が長い試験片ほど腐食進展速度は遅くなった。このことは，電着塗膜の架橋密度が低いほど塗膜が保水し易く，塗膜下に水やイオン物質，溶存酸素が供給され易いこと，化成処理時間が短いものほど被覆率が悪化して塗膜下で腐食電流が流れ易いことに起因すると考えられる。実腐食試験に基づき評価した腐食進展速度と本技術により評価した腐食進展速度との間にはR^2=0.98 と高い相関が認められた。本技術の腐食の加速性は，従来の実腐食試験と比較して約 800 倍であり，極めて迅速に評価を行うことができる。代表的な試験片の試験後のカソード部を観察した（Fig. 11 参照）。この写真は塗膜膨れをテープ剥離した後のものである。今回の塗装条件の範囲において，化成処理の時間が長く，更に電着塗料の加熱温度が高く，加熱時間も長い右下の試験片ほど，試験後の塗膜剥離面積（径）が小さく，腐食進展速度が遅いことがわかる。以上のことから，本評価法により腐食進展速度を定量的に短時間で評価できることが分かった。

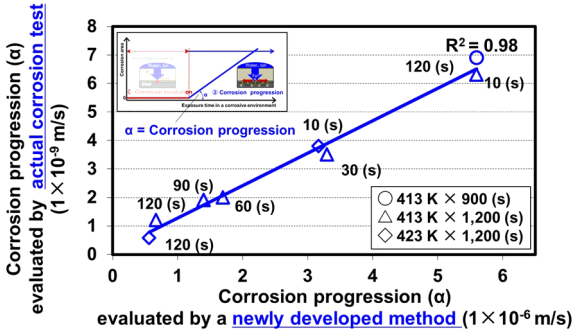


Fig. 10　Differences in Corrosion Progression Evaluated by Newly Developed Method Due to Changes in Coating Specifications, Steel: A, Zinc Phosphate: E (Time: 10-120s), E-coat: G (Baking: 413K×900s-423K×1,200s, Thickness: 10μm).

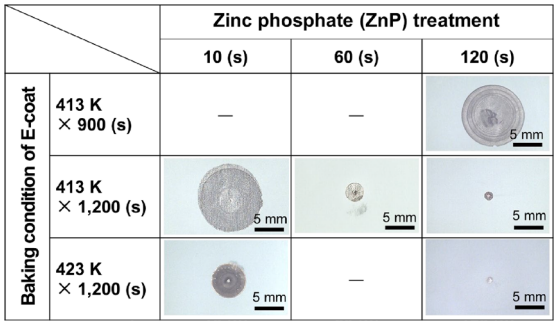


Fig. 11　Peeling State of Coating on Test Pieces after the Test Due to Changes in Coating Specifications, Steel: A, Zinc Phosphate: E (Time: 10-120s), E-coat: G (Baking: 413K×900s-423K×1,200s, Thickness: 10μm).

3.3　本技術の効果から考えられる技術適用先

本評価技術は，塗料や塗装前処理の研究開発，製造工場での品質管理から市場調査と幅広い領域で活用が可能である（Table 2 参照）。例えば，研究開発では従来の錆の程度を確認する定性的な技術開発から，塗装部の防錆機能を定量的，かつ迅速に評価する技術開発にプロセス変革できることから，新塗装材料の設計やその機能発現メカニズムの解明，制御技術の飛躍を実現できる。次に，製造現場での日々の品質管理においては，従来は不可能であった防錆品質の日々管理が可能となり，より緻密に品質変動を制御・最小化できる。専門性が不要で一般作業従事者も評価可能である。また，本技術は塗装鋼板を主として使用する自動車業界以外の運輸，電気，家電，建設，プラント，土木，住宅等の全産業界での応用が期待できる。ただし，室外での塗膜の劣化調査などへの展開を考慮すると，試験環境温度の管理方法など改善が必要な項目がある。

次に，具体例として溶接部周辺の耐食性改善を目指した塗料や塗装前処理の研究開発に本技術を活用した事例を示す（Fig. 12 参照）。溶接ビード周辺の酸化皮膜の除去や塗料の改良によって，実腐食試験において錆の程度が抑制されていることが分かる。本技術を用いて評価を行うと，目視の定性的な評価ではなく，腐食抑制期間は一般塗料（タイプ H）と比較して改良塗料（タイプ I や J）では約 2〜3 倍，腐食進展速度は酸化皮膜の除去を行ったタイプ C や D では，未除去のものと比較して 1/2〜1/8 倍であることが定量的に確認できた。

Table2　Scope of Utilization of a New Accelerated Evaluation Method for Corrosion Resistance

	① Evaluation of Corrosion incubation	② Evaluation of Corrosion progression
1. Research on new materials	○ ・E-coat	○ ・Pretreatment of painting ・Inhibitor
2. Quality control	○ ・Manufacturing conditions ・Daily check	○ ・Manufacturing conditions ・Daily check
3. Market survey and analysis	○ ・Deterioration	△ ・Deterioration

○ Practical level, △ Practical examination level

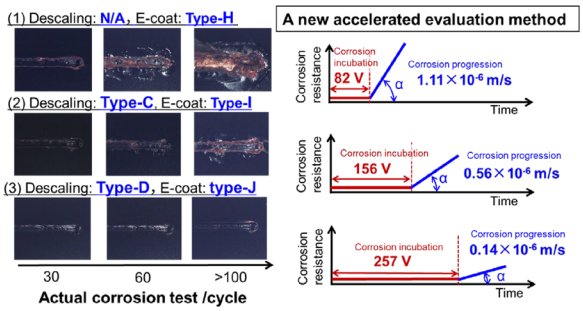


Fig. 12　Examples of Technology Utilization for Research and Development of New Rust Preventive Technologies Such as Paints and Pre-treatment of Painting

4. おわりに

塗装部の防錆機能は，①腐食抑制期間（塗膜が腐食因子を遮断して錆が抑制される期間）と②腐食進展速度（塗膜下で腐食反応が起きて錆が進展する速度）で整理でき，その双方を塗膜の性能発現メカニズムに基づいた，モデルベース研究開発手法を活用して定量評価する技術を開発した。腐食抑制期間は，塗装面上に電解質溶液を保ちながら，塗装金属材の鋼板と塗膜表面との間に時間に対して徐々に増大する電圧を印加し，水とイオン物質を強制的に塗膜に透過させ，通電により塗膜が絶縁破壊するときの電圧値に基づいて定量評価できることがわかった。塗装仕様をさまざまに変化させた試験片を用いた検討から，この絶縁電圧と実腐食試験における錆発生までの期間には高い相関（R^2＝0.92）が認められ，電着塗装の膜厚と膜質（架橋密度）が影響する腐食抑制期間を本評価技術で精度良く測定できることがわかった。腐食進展速度は，塗装面上に電気化学的にアノードとカソードを個別に形成し，腐食を促進させ，カソード側に発生した塗膜膨れの大きさと電流印加時間との関係に基づき定量評価できることがわかった。腐食進展速度に影響を及ぼすと考えられる電着塗装の膜質の影響に加え，化成処理条件の違いによる性能差も定量的に評価可能であることが分かった。

参考文献

(1) 腐食コスト調査委員会：わが国の腐食コスト，材料と環境，Vol.50, pp.490-512（2001）
(2) 浅田照朗ほか：塗装部の新規耐食性短期評価法の開発，及び防錆技術開発・品質管理への活用，自動車技術会学術講演会講演予稿集，No.42-17, pp.1148-1151（2017）
(3) 石井均：自動車車体用リン酸亜鉛処理，表面技術，Vol.61, No.3, pp.232-238（2010）
(4) 石井均：リン酸塩処理の基礎，表面技術，Vol.61, No.3, pp.216-222（2010）
(5) 中山隆臣：塗装前処理としてのリン酸塩処理，表面技術，Vol.64, No.12, pp.640-644（2013）

■著　者■

浅田 照朗

佐々木 將展

江﨑 達哉

重永 勉

髙見 明秀

論文・解説

25 MBD/MBRの実現に向けた，繊維強化樹脂複合材内部における微視的破壊現象の可視化／評価技術

Technology of Visualization and Evaluation of Microscopic Fracture Behavior Inside Fiber Reinforced Plastic Composite Material for Implementation for MBD/ MBR

河村　力[*1] Chikara Kawamura
高橋　拓也[*2] Takuya Takahashi
住田　弘祐[*3] Hirosuke Sumida
杉山　哲也[*4] Tetsuya Sugiyama
上田　政人[*5] Masato Ueda
米山　聡[*6] Satoru Yoneyama
轟　章[*7] Akira Todoroki
宮永　俊明[*8] Toshiaki Miyanaga
西田　健二[*9] Kenji Nishida
横関　智弘[*10] Tomohiro Yokozeki
樋口　諒[*11] Ryo Higuchi

要　約

低燃費のための車両軽量化と，人命保護のための衝突安全性能向上の両立は自動車開発における大きな課題であり，その解決には構造技術だけでなく材料技術の革新が重要である。材料技術の革新には，車両機能からバックキャストした，効率的な技術開発が必要である。マツダでは，そのためのイネーブラーとして，材料開発から車両開発までを机上で行う Model Based Development/Model Based Research（MBD/MBR）の構築を進めており，微視的な現象のモデル化に取り組んでいる。そのために，モデルを検証するための微視的な現象の可視化・評価技術が必要である。

本稿では，車体軽量化に高い効果が期待できる複合材料を題材に，微視的な現象の可視化・評価技術を構築した事例を紹介する。可視化には SPring-8 の放射光を用いた CT 撮像と独自の In-situ 試験装置を組み合わせ，密度差が小さな材料であっても，負荷過程の変形挙動を観察可能な技術を構築した。評価には繊維や樹脂の特徴点を活用した Digital Volume Correlation（DVC）を用い，材料の内部まで含めた変形量を定量評価可能な技術を構築した。

Abstract

Achieving both weight reduction of vehicles for low fuel consumption and improvement of crash safety performance for human life protection is a major task in car development. Innovation of material technology as well as structural technology is important to achieve such a task. Innovation in material technology requires efficient and effective technological development that is backcasted from vehicle functions. As an enabler, Mazda is building Model Based Development/Model Based Research (MBD/MBR) that handle the process from material development to vehicle development on the desk, working on modeling microscopic phenomena. We need techniques for visualizing and evaluating microscopic phenomena to verify the model.

In this paper, we will introduce an example of constructing a visualization and evaluation technology for microscopic phenomena using composite materials, which are highly expected to reduce the weight of the vehicle body. For visualization, we combined CT using synchrotron radiation with our original in-situ test equipment, and constructed a technology that can observe the deformation behavior of the loading even for materials with a small density difference. For the evaluation, we used a Digital Volume Correlation (DVC), which utilizes the characteristic points of fibers and resins, and constructed a technology that can quantitatively evaluate the amount of deformation including the inside of the material.

*1,3,9　技術研究所
Technical Research Center
*2,7　東京工業大学
Tokyo Institute of Technology
*4,8　日鉄ケミカル＆マテリアル（株）
NIPPON STEEL Chemical & Material Co., Ltd.
*5　日本大学
Nihon University
*6　青山学院大学
Aoyama Gakuin University
*10,11　東京大学
Tokyo University

Key words : Materials, Non-ferrous material, Test/Evaluation, Synchrotron X-ray, Composite

1. はじめに

低燃費のための車両軽量化と，人命保護のための衝突安全性能の向上を両立することは自動車開発における大きな課題であり，その解決には構造技術だけでなく材料技術の革新が有効な手段となる。材料技術の革新には，超ハイテン化やアルミの高強度化・高靭性化等があるが，特に軽量化に有望な材料として炭素繊維等を用いた複合材料がある。複合材料は母材と強化繊維の組み合わせだけでなく，繊維の含有率・配向・層構造といった材料構造に関する設計因子が多く，車両の要求機能に対して高度な制御が可能である。反面，その材料構造により複雑な挙動をとるため，最適解の探索には材料スケールの因子から車両スケールの因子までそれぞれを扱うことが可能なモデルと，それらを繋ぐフレームワークが必要となる。そのため，Fig. 1 に示すようなMBD/MBR[1][2] を構築し，車両機能からバックキャストした革新的な材料開発や，新材料の車体機能における価値を定量的に算出できるプロセスの構築を目指している。このプロセスを構築する上での大きな課題の一つは材料スケールの因子を取り扱うモデル化技術の確立であり，そのためには微視的な現象の可視化と評価技術が必要となる。

以上から，複合材料を用いるマルチマテリアル車体を想定した，衝突性能の MBD/MBR 構築に向け，微視的な現象の可視化・評価技術を開発した事例を紹介する。

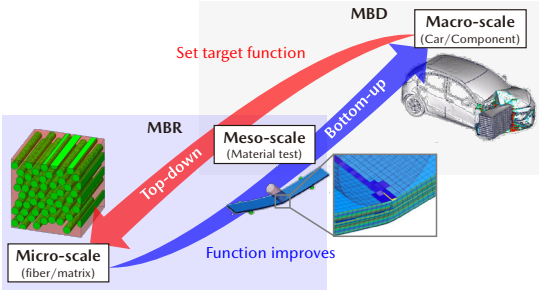


Fig. 1　Vision of Model Based Design and Research

車体の衝突現象の多くは，薄板中空フレームの曲げ変形であり，先行論文[3][4] で示したとおり，座屈現象によりその強度特性が決まっていることが多い。そのため部材機能に対しては，材料の圧縮特性が大きく影響を及ぼす。今回対象とする連続繊維強化型 CFRP は，Fig. 2 に示すように引張強度よりも圧縮強度が低く，また脆性材料であるため，圧縮強度が車両機能に大きく寄与することが推察できる。

そのため，本研究では複合材料を用いた車体において，重要な機械特性である繊維方向圧縮強度の予測モデルの構築に向け，圧縮強度を決める微視的な現象の可視化に取り組んだ。

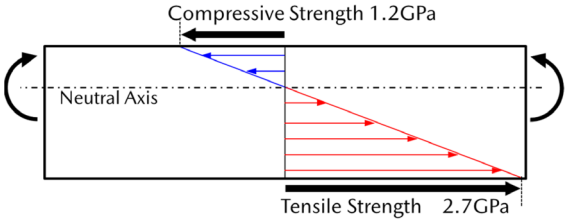


Fig. 2　Stress State under a Bending Frame

2. 可視化実験

2.1　評価対象

連続繊維強化型の CFRP の圧縮強度は，Fig. 3 に示すようなキンクと呼ばれる繊維の長手方向の局所座屈によって決まることが，上田らの報告[5] により知られている。先行研究では炭素繊維の体積含有量（以下，Vf）が 40%前後のものが多いが，本稿では車両の構造部材を想定しているため，炭素繊維の Vf が 60%と高い点が異なる。また，先行研究は汎用的な X 線 CT を用いており，繊維一本一本の挙動までは明確にとらえられていないが，樹脂の応力分布や界面の剥離状況までモデル化することを想定しているため，繊維一本一本まで明瞭にとらえることを目指す。

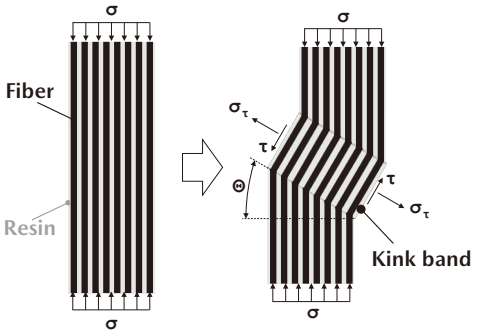


Fig. 3　Microscopic Behavior that Determines Compression Strength

2.2　評価方法

(1) 評価設備

現象を把握しモデル化するには，材料内部まで含めた観察が必要であり，FIB-SEM や X 線 CT などの方法が一般に利用される。しかし，FIB-SEM は試料をイオンビームで削り内部断面を得る破壊分析であるため，原理的に負荷過程の挙動をとらえられない。また，一般的な X 線 CT 装置では，炭素繊維と樹脂の密度差が小さく CT 像の細部が不明瞭となる。これは，CT 像の基となる X 線透過像において，X 線の波長が短く試料を良く透過するほど内部の密度差に起因する投影が薄くなる等，トレードオフ関係があることによる。そのため，一般的 X 線源の約 10 億倍輝度が高い

アンジュレータ放射光源を利用することで，試料の X 線透過性を維持しつつ，内部投影コントラストに差が出るような放射光の波長条件を選び，目的に適うように繊維と樹脂を分別可能とする方法を見出した。その放射光 CT 撮像には Fig. 4 に示す SPring-8 の BL-24XU を使用した。

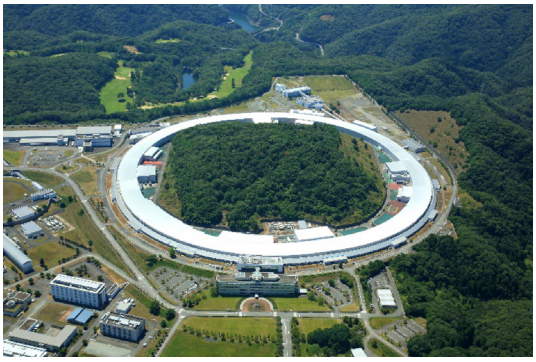


Fig. 4　Exterior of SPring-8[6]

(2) 評価方法

本評価では圧縮負荷過程の材料内部の変形挙動を撮像する必要があるため，独自に設計した装置を用い評価した。

a. 試験片と圧縮負荷条件

評価には母材をエポキシ樹脂，繊維に東レ㈱製炭素繊維の T700SC を用いた。エポキシ樹脂は日鉄ケミカル＆マテリアル㈱にて独自開発したものを用い，オートクレーブにて成形後，機械加工にて試験片形状に切り出した。Fig. 5 に試験片形状と In-situ 圧縮試験装置の概略図と外観を示す。In-situ 圧縮試験装置のインナーケースとアウターケースについては，X 線の透過率を考慮した材料・板厚としつつ，必要な解像度から検出器との距離等を考慮した寸法としている。また，上部にアクチュエーターを設け，撮像時に負荷を掛けられる機構とした。

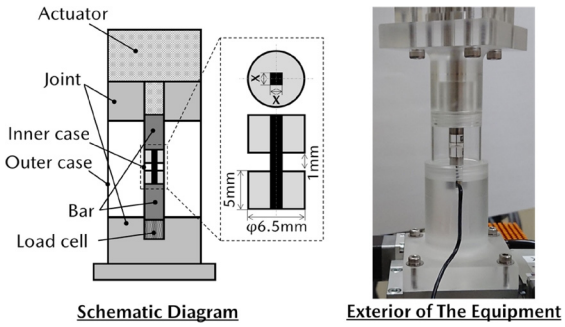


Fig. 5　In-situ Compression Test Equipment

b. 評価条件

X 線 CT 撮像にあたり，試験片挙動の全体をとらえることを目的とした投影型と，視野範囲は狭くなるが，より明瞭に現象をとらえることが期待できる結像型の 2 つの方法で撮像を行った。投影型と結像型の評価手法の差を Fig. 6 に，評価条件と画像の情報を Table 1 に示す。一般的な CT 撮像方法である投影型は，試験片を透過した X 線を直接検出器で撮像するのに対し，結像型はフレネルゾーンプレートを用いる。可視光顕微鏡と同様に，直接拡大した上で撮像を行うため，高い分解能を得らえる撮像手法である。本計測でも，理論的な分解能は投影型に対し結像型は約 4 倍に向上した。一方で，視野は検出器の容量に律速するため，4 分の 1 に狭まる。この 2 条件での撮像を行うことで，キンク発生部位の特定をすると同時に，キンク発生直前の繊維界面の剥離の有無まで含めて評価する。

Table 1　Detail of Test Condition and Resulting Image

	Projected X-ray CT	Imaging X-ray CT
Energy (keV)	15	10
Exposure Time (sec)	0.1	0.4
Deforcus (mm)	20	2
Image Resolution (nm/pixel)	325	87
The Number of Pixels (pixel)	2048×2048×2048	2048×2048×1148

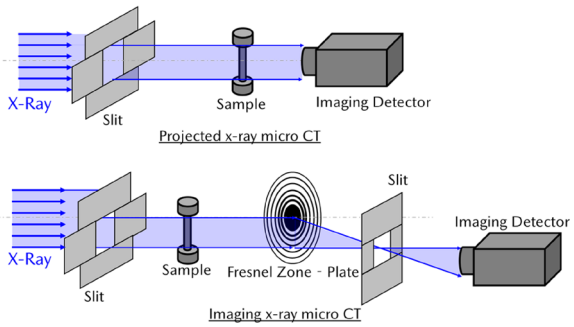


Fig. 6　Measurement Methods of Projected and Imaging X-ray Micro CT

3. 実験結果

3.1　荷重特性

今回用いる試験片は，一般的な CFRP の圧縮強度を取得する試験片よりも評点部の寸法が小さい。そのため材料の不均質性や亀裂進展の影響の差から，評点部の寸法が小さくなることにより強度が変化する，寸法効果が発生するリスクや，治具・タブ構造の剛性等により適切な圧縮負荷できないリスクがある。そのため In-situ 圧縮試験装置の妥当性確認のため，JIS K7018 Type A2 に準拠した一般的な圧縮強度との比較を行った。圧縮試験装置治具での圧縮強度の評価は Fig. 7 に示すとおり，同一の試験片・タブと圧縮試験装置の内管を切り出した物を組みたて万能試験機にて圧縮した。計測した強度の比較結果を Fig. 8 に示す。JIS 規格と In-situ 圧縮試験装置で取得した圧縮強度には大きな差はなく，適切な圧縮試験が出来ていることを確認した。

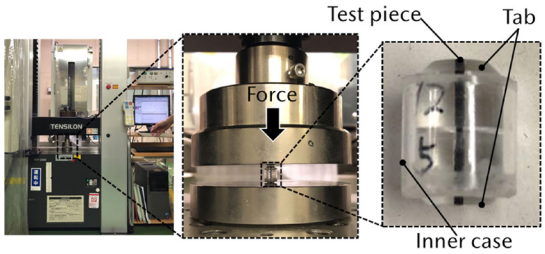


Fig. 7　Evaluation of Compression Strength in a Simulated In-situ Test Equipment

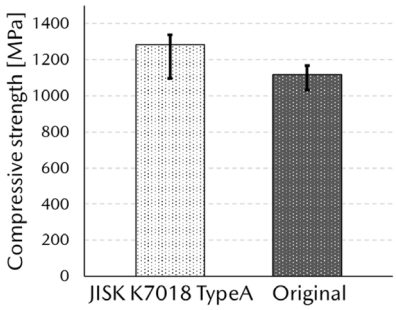


Fig. 8　Comparison of Compressive Strength between JIS K7018 Type A1 and In-situ Test Equipment

3.2　撮像結果

無負荷状態における，繊維直行方向の撮像結果を Fig. 9 に示す。撮像の目的は，繊維の正確なアライメントと繊維界面の剥離状態を確認することだが，投影型でも繊維と樹脂を明確に判別可能で，目的を達成できることが分かる。結像型では更に繊維と樹脂の境界が明瞭にとらえられており，より精度の高い情報を期待できる。以上から，ミクロモデルの構築に有効な画像を取得可能であることを確認できた。

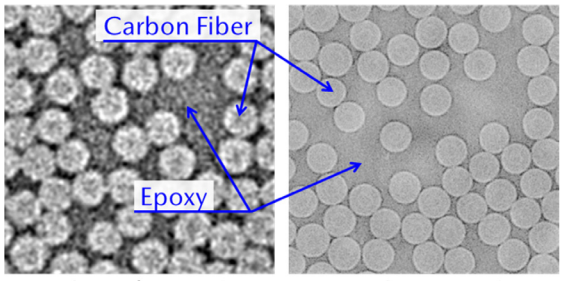


Fig. 9　Comparison of Measurement Results between Projected X-ray CT and Imaging X-ray CT

次に投影型 X 線 CT で撮像した画像から構築した，最大荷重前後の 3 次元画像を Fig. 10 に示す。最大荷重が発生する直前では初期の矩形形状を維持しているのに対し，最大荷重発生後ではせん断帯が発生し，試験片が完全に破断していることが確認できる。しかし，先行文献のような破断前に発生する微小領域での繊維の局所座屈は観察できなかった。これは先行文献に対し，炭素繊維の含有率が高く，局所座屈が発生した後の飛び移り現象が急激に起こるため，キンクが発生した状態で現象を留めることが困難だったためと考えられる。

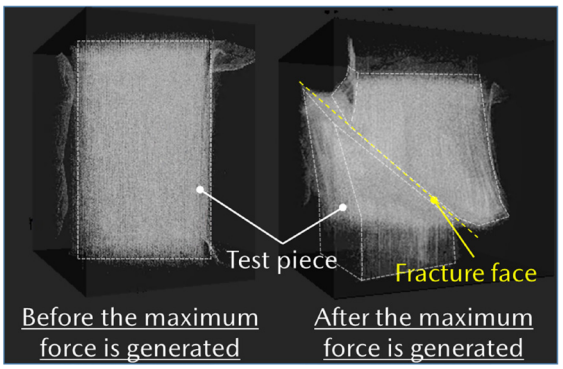


Fig. 10　3D Image before and after Maximum Force

最大荷重発生後の 3D 画像から，繊維方向の断面画像を示したものを Fig. 11 に示す。板厚の中央部と表面部で破断後の繊維の向きは異なるが，繊維の破断面を確認することができた。ここから繊維の初期破断時のせん断帯の角度を算出すると 25 度であり，先行文献で示されるキンクバンドの発生角は 20 度から 30 度[8] と一致することが確認でき，想定どおりの現象が発生していたことが予測される。

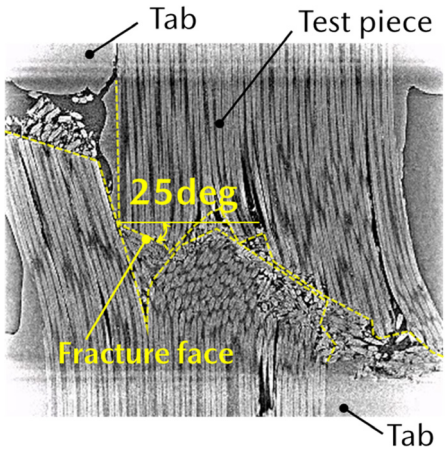


Fig. 11　Measurement Results on Fiber Direction after Maximum Force is Generated

次に評価技術について述べる。モデル化には現象解明のための可視化だけでなく，構築したモデルの精度検証も必要である。実機と解析で定量比較するには，Digital Image Correlation（DIC）等による表面ひずみの評価技術が有効であるが，今回は材料の内部まで含めた評価と，μm 単位の変形を追従する必要があるため分解能の向上が必要となる。そこで，炭素繊維や樹脂内部のマーカーを特徴点として利用した Digital Volume Correlation（DVC）を用いた評価技術[7] の開発も行った。評価事例を Fig. 12 に示す。Fig. 10 の最大荷重発生前の 3D 像では確認できなかった，各座標方向の変位を確認することができる。また変位量も連続的に移り変わっており，一定の妥当性があることも確認できた。

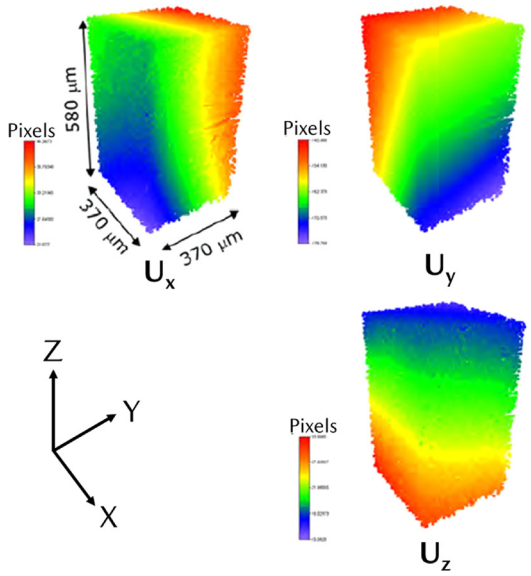


Fig. 12　Measurement Methods of Displacement

4. おわりに

材料から車両機能までの研究開発を机上で実現するMBD/MBRの構築に向け，微視的な現象の可視化・評価技術の構築を試みた。車体軽量化に期待される炭素繊維強化型複合材を対象に，シンクロトロンを活用した放射光X線CTを用い，圧縮負荷過程における材料内部の振る舞いを可視化できる技術を構築した。また従来の投影型から結像型に変えることで，繊維と樹脂の境界を明瞭にとらえることに成功し，ミクロモデル構築に必要なデータを取得できた。加えて，X線CT像を対象にデジタル画像相関法の一つであるDVCを用いることで，材料内部まで含めた変形量を定量評価可能な技術を構築した。

今後これらの可視化・評価技術を用い，材料のミクロモデルを構築し，MBD/MBRのフレームワークを完成させ，車両機能からバックキャストした材料・構造を導出し，自動車の軽量化開発に貢献する。

公益財団法人高輝度光科学研究センター・大型放射光施設SPring-8での実験は課題番号2019B3054，2020A3231，2020A3054，2020A3389，2021A3231，2021A3054で実施しました。ここに厚くお礼申し上げます。

参考文献

(1) Yuma Miyauchi et al.: Stochastic homogenization analysis of FIB-SEM image-based hierarchical model of sprayed porous ZrO_2, Mechanical Engineering Letters, Vol.1, pp.1-8（2015）
(2) 山川ほか：材料モデルベースリサーチによる多孔質吸音材微視構造設計技術の開発と吸音部品設計への適用，マツダ技報，No.37，pp.75-80（2020）
(3) 本田ほか：薄肉中空フレームにおける曲げ強度の質量効率を向上させる断面形状の研究，自動車技術会学術講演会前刷り集，No.129-14，pp.1-4（2014）
(4) 河村ほか：曲げ変形における高エネルギー吸収フレームの開発，マツダ技報，No.33，pp.118-123（2016）
(5) Masahito Ueda et al.: In situ observation of kink-band formation in a unidirectional carbon fiber reinforced plastic by X-ray computed tomography imaging, Advanced Composite Materials, pp.31-43（2016）
(6) 国立研究開発法人理化学研究所から提供
(7) Satoru Yoneyama et al.: Measuring Strain Distribution of Knee Cartilage Using Digital Volume Correlation, SEM XIV International Congress on Experimental Mechanics（2020）
(8) T. J. Vogler et al.: On the axial propagation of kink bands in fiber composites: Part I experiments, International Journal of Solids and Structure, No.36, pp.557-574（1999）

■著　者■

河村 力

高橋 拓也

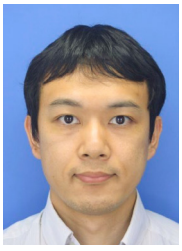
住田 弘祐

杉山 哲也

上田 政人

米山 聡

轟 章

宮永 俊明

西田 健二

横関 智弘

樋口 諒

論文・解説

26 車両機能と材料特性をつなぐマルチスケール解析技術の研究

Research on Multiscale Analysis Technology that Connects Vehicle Functions and Material Properties

西田　健二 *1　氷室　雄也 *2　河村　力 *3
Kenji Nishida　Katsuya Himuro　Chikara Kawamura
本田　正徳 *4　藤元　伸悦 *5
Masanori Honda　Shin-etsu Fujimoto

要　約

低燃費のための車体軽量化と，クルマの商品性向上のための操縦安定性能や乗り心地性能の両立が求められている。これら要求を同時に満足するには，材料・部品・車体の各スケールをつないで材料と構造の両面で機能を最大限に引き出すことが必要である。しかしながら，現状は，材料と構造の個々のモデルは存在しているが，それぞれのモデルをつなぐ方法論は確立されていない。そこで，車体性能からバックキャストして革新的な材料技術を創出することをねらい，材料モデルから車両の構造モデルまでをつなぐ技術開発に着手した。今回，樹脂複合材による車体性能の向上を題材に，材料から車体モデルまでのインプットとアウトプットをつなぐ手法を構築した。これにより，材料特性から車体性能を予測する順解析と，車体性能を満足するための構造・材料の指針を導出する逆解析を行うことが可能となった。本稿ではその取り組みについて報告する。

Abstract

It is required to achieve both weight reduction for low-fuel consumption and maneuvering stability performance and ride comfort performance for improvement of the productivity of cars. In order to achieve both these requirements, it is necessary to maximize the functions of both materials and structures beyond each scale of materials, parts, and car bodies. However, at present, individual models of materials and structures exist, but the methodology for connecting each model has not been established. Then, the technology development which connects the objects, ranging from the material model to the structural model of the vehicle has started with the aim of creating the innovative material technology by backcasting from the body performance. This time, aiming at the improvement of the body performance with the resin composite material, the technique which connects INPUT and OUTPUT information of the objects, ranging from the material to the car body model was constructed. This model technology enables us to do forward analysis that predicts vehicle body performance from material properties and reverse analysis that derives guidelines for structures and materials to satisfy vehicle body performance. This paper reports on these efforts.

Key words : Driving stability, Body structure, Weight reduction, Design optimization, Body material, Vibration, Optimization technique, Modal analysis, Composite material, Stiffness

1. はじめに

マツダは，2017 年に，2030 年を見据えた技術開発の長期ビジョン「サステイナブル “Zoom-Zoom” 宣言 2030」を公表し，車のもつ魅力である「走る歓び」によって，「地球」，「社会」，「人」のそれぞれの問題解決を目指している。近年，CO_2 排出量低減に向けて，さらなる車両の軽量化が必須となる一方，「走る歓び」につながる車両の性能の向上が求められている。これらの要求を達成するためには，クルマの性能からバックキャストし，クルマの価値を向上することのできる材料を実現するとともに，その材料の性能を最大限活用できる構造の実現

*1〜4　技術研究所
Technical Research Center
*5　日鉄ケミカル＆マテリアル（株）
NIPPON STEEL Chemical & Material Co., Ltd.

が必要になる。

一方，大幅な軽量化を実現するため車体のマルチマテリアル化の検討が進められており，軽量高性能材料として，繊維強化樹脂が注目されている。さまざまな材料や，材料内部の性能を質量効率よく利用するためには，材料と構造を同時に開発し，それぞれの性能を最大限に発揮させることが必須である。しかし，現状は，材料と構造の個々のモデルは存在しているが，それぞれのモデルをつなぐ方法論は確立されていない。そこで，メカニズムに基づき機能をモデル化することで，多性能・高機能を実現する考えを基に，モデルの検討を進めた。具体的には，CFRP（Carbon Fiber Reinforced Plastic）のもつ異方性の活用による，車体の剛性と減衰性の向上を題材として，材料と車体性能をつなぐモデルの技術開発を行った[(1)]。

2. 材料と車体性能をつなぐモデルの構築

2.1　異なるスケールのモデルをつなぐ方法

材料と構造を同時に開発するためには，材料特性が車体性能に与える影響を予測する順解析と，車体性能目標から目標を満足するために必要な，構造や材料の要件を算出する逆解析ができる状態にすることが課題である。

この解決のアプローチとして，順解析は，各スケールのモデルにおけるインプットとアウトプットをメカニズムに基づいて整理し，モデル間でつなぎ合わせることで対応する。また，逆解析のためには，スケール間を跨ぐ大規模な数値探索が必要となるため，各スケールのシミュレーションモデルを，計算コストが極めて小さなサロゲートモデルに置き換えることで対応する。このサロゲートモデルの構築には機械学習を活用する。具体的には，少ないデータでサロゲートモデルの精度を確保するため，実験計画法に基づいた各スケールのシミュレーションでデータ群を取得し，それを学習データとして応答局面モデルを構築した。今回は，ESTECO 社製 modeFRONTIER で実装されている応答曲面法を用いた。

以上により，材料，部品，車体構造の各スケールのインプット（制御因子）とアウトプット（目的関数）の関係を解くモデルを開発した。モデルの全体像を Fig. 1 に示す。

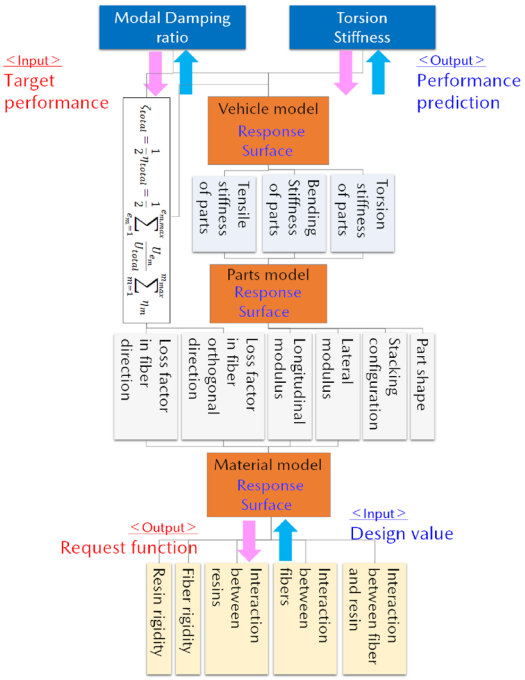


Fig. 1　Overview of the Model

2.2　各スケールのモデル

（1）材料モデル

産学連携プロジェクトで開発されたマルチスケールシミュレーションプラットフォーム OCTA に含まれる粗視化分子動力学シミュレーター COGNAC を用いて，炭素繊維とエポキシ樹脂のモデル化を行った（Fig. 2）。モデルで扱う制御因子は，樹脂の剛性，繊維の剛性，樹脂同士の相互作用，繊維同士の相互作用，繊維と樹脂の相互作用の 5 因子とした。樹脂同士の相互作用は，樹脂の分子鎖の絡み合い度合い，繊維同士の相互作用は繊維の分散度合い，繊維と樹脂の相互作用は繊維と樹脂の密着度合いと解釈し解析を実施した。モデルの振動解析により得られるヒステリシス曲線（Fig. 3）から，繊維方向と，繊維直交方向の弾性率と，損失係数を算出した。

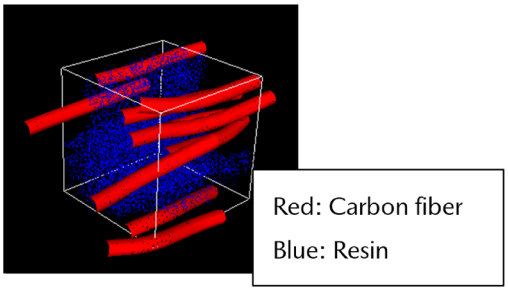


Fig. 2　Material Model

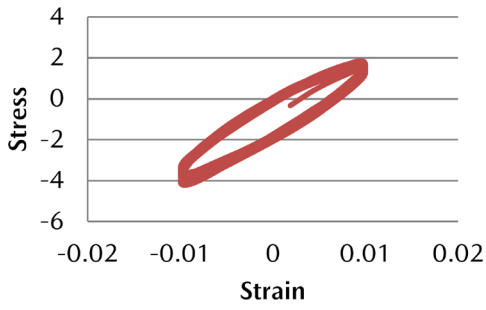


Fig. 3　Hysteresis Curves

（2）部品モデル

対象とする補強部材を梁要素でモデル化し（Fig. 4），車体フロアのトンネル部に取り付けた。部品構造の制御

因子として，梁部分の断面高さ，断面幅，高さ方向の板厚，幅方向の板厚とした。材料物性の制御因子として縦弾性率，横弾性率，繊維方向の損失係数，繊維直交方向の損失係数とし，構造と材料の各因子の数値を制御することにより部品の機能検討を行った。なお，繊維配向は，CFRP の異方性の特性を最大限に利用できる，梁要素長手方向への一方向性材とした。

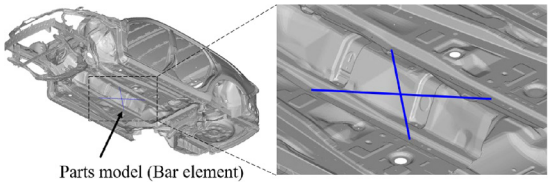


Fig. 4　Parts Model

（3）車体モデル

シェル要素で構成された車体構造（Fig. 5）に対し，NASTRAN を用いた静解析，及び，固有値解析を実施した。

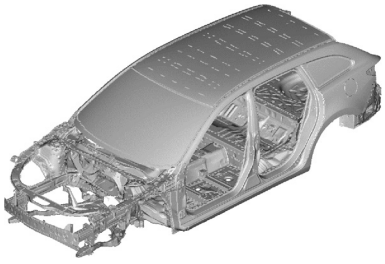


Fig. 5　Car body Model

対象とする性能は，車体ねじり変形時（Fig. 6）の剛性（以下，車体ねじり剛性）と，フロア振動モード（Fig. 7）でのモード減衰比の変化で評価した。フロア振動モードのモード減衰比は，車体の総ひずみエネルギーと，部品のひずみエネルギーから算出されるエネルギー分担率と，部品の損失係数を用いて，式（1）によりモード減衰比を算出した。

$$\zeta_{total} = \frac{1}{2}\eta_{total} = \frac{1}{2}\sum_{e_m=1}^{e_{m_max}} \frac{U_{e_m}}{U_{total}} \sum_{m=1}^{m_{max}} \eta_m \qquad (1)$$

ζ_{total} はモード減衰比，η_{total} は損失係数，U_{total} は車体のひずみエネルギー，U_{e_m} は部品のひずみエネルギー，η_m は部品を構成する減衰材料の損失係数である。

3. モデルを用いた解析の実施

3.1　最適解の探索

順解析を行った結果を Fig. 8 に示す。材料と構造の特性の制御により車体性能がどのように変化するかの解析結果が得られることを確認している。また，応答曲面を用いた多目的最適化（逆解析）計算を行うことで，設定

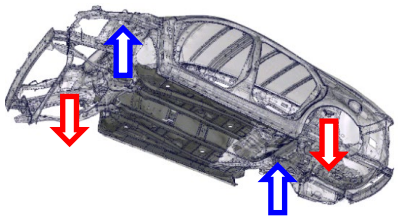


Fig. 6　Car Body Torsion Mode

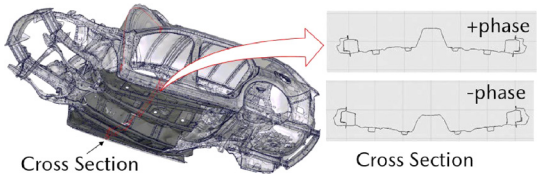


Fig. 7　Car Body Floor Vibration Mode

した設計空間での車体ねじり剛性と，フロア振動モードのモード減衰比の最適解の集合を示すパレート解を算出することが可能である。多目的最適化においては，これらパレート解の中から，目的にあった解を選択することで，最適解を得ることが可能となる。

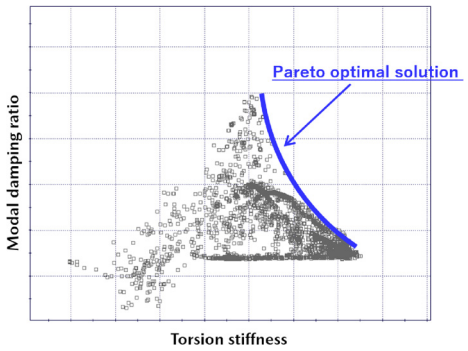


Fig. 8　Analysis Results of Car Body Performance

3.2　データマイニングによる設計指針の導出

車体ねじり剛性と，フロア振動モードのモード減衰比を向上させる汎用的な設計指針を得るために，最適化計算で得られた多量のデザイン群に対して主成分分析を行った。今回対象としている車体ねじり剛性と，フロア振動モードのモード減衰比を，目的関数として赤色の矢印で示している。材料の制御因子は①樹脂の剛性，②繊維の剛性，③樹脂同士の相互作用，④繊維同士の相互作用，⑤繊維と樹脂の相互作用としている。構造の制御因子は，⑥断面高さ，⑦断面幅，⑧高さ方向の板厚，⑨幅方向の板厚としており，材料と構造の各制御因子は青色の矢印で示している。

赤色の矢印のベクトルに対し，青色の矢印のベクトルの内積の大きい因子ほど，目的関数である車体性能への寄与が高くなることを示している。また，矢印の方向に

より，正の相関があるか負の相関があるかを示している。

車体性能と材料特性の関係性を示した結果を Fig. 9 に示す。この結果から，樹脂と繊維間の相互作用，繊維剛性は車体ねじり剛性にのみ寄与することが分かり，樹脂間の相互作用は，フロア振動モード時のモード減衰比向上に寄与することが分かる。また，樹脂の剛性に関しては，車体性能に対し，負の相関があることが分かる。このことから，これらの因子は，車体ねじり剛性とフロア振動モードのモード減衰比の向上に有効であることが分かる。一方で，繊維間の相互作用に関しては，ねじり剛性には正の相関があり，フロア振動モード時のモード減衰比には負の相関がある。このことから，繊維間の相互作用では，車体ねじり剛性とフロア振動モードのモード減衰比の両立が困難であると推測できる。

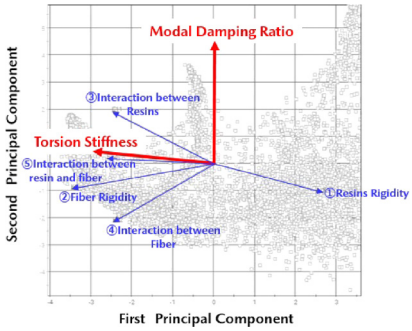


Fig. 9　Result of Principal Component Analysis
(Car Body Performance and Material Properties)

車体性能と構造因子の関係性を示した結果を Fig. 10 に示す。この結果から，部品の断面高さに関する因子は，車体ねじり剛性とフロア振動モードのモード減衰比に対し正の相関にあり，部品の断面幅に関する因子は負の相関にあることが分かる。このことから，部品性能としては，高さ方向の曲げ剛性の確保が必要なことが分かる。また，部品の幅方向の因子は負の相関性があることが分かる。このことから，部品の高さと幅のアスペクト比が影響するねじり剛性に関しては，下げる方向へ制御する必要があると推測することができる。

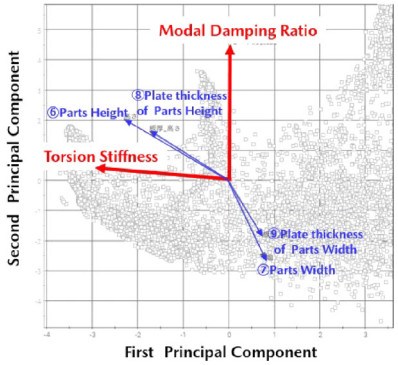


Fig. 10　Result of Principal Component Analysis
(Car Body Performance and Structural Properties)

以上から，構築した解析技術によって，車体性能を確保するために必要な材料の制御指針と，構造の制御指針を導出することが可能である。

4. 解析結果の検証

4.1　材料因子の制御指針の妥当性検証

材料の剛性については，複合則のなどの古典理論から妥当性を理解できることから，今回は，モード減衰比の制御因子について，減衰発現メカニズムを基に検証した。

(1) 減衰性向上因子の制御指針

逆解析の結果，樹脂間の相互作用の向上，つまり樹脂の分子鎖の絡み合い度合いを高くすることで，減衰性能が向上することを示唆している。これは，減衰発現メカニズムとして，材料内部の分子鎖間摩擦による熱エネルギー変換と散逸によるものと考えられる。樹脂の分子鎖の絡み合い度合いが高くなれば，分子鎖間摩擦が発生する箇所が多くなることから，減衰性能が向上するものと考えられる。

(2) 減衰性向上指針の妥当性検証

汎用エポキシ樹脂と，樹脂間の相互作用を向上させた改良エポキシ樹脂を使用した一方向性 CFRP の短冊試験片を試作し，試験片端部加振による加振点応答から減衰性能を計測した。Fig. 11 に試験方法を示す。

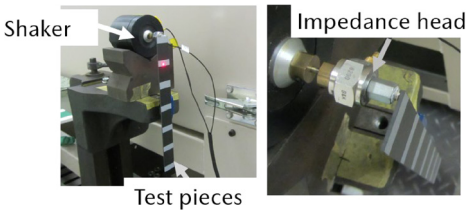


Fig. 11　Vibration Test of Test Pieces

なお，減衰性能の計測は，性能を顕著に測定できるねじりモードで実施しており，対象とするねじりモードの特定はレーザー振動計を用いた。

Fig. 12 に実験結果を示す。汎用エポキシ樹脂を使用した試験片に対し，改良樹脂を使用した試験片は，基材のエポキシ樹脂にエラストマー成分を加え，かつ，相溶性を向上させている。これにより，改良樹脂は，樹脂内の相互作用を向上させることができていると考えている。

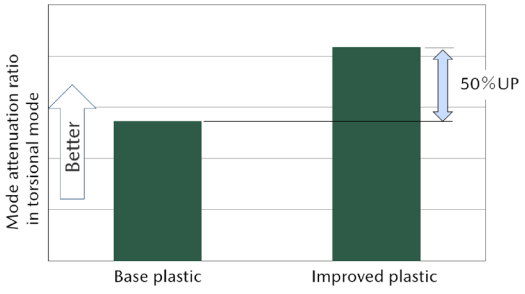


Fig. 12　Results of the Vibration Test of the Test Piece

汎用エポキシ樹脂に対し，改良樹脂は減衰性能を約50%向上させることが可能であることから，解析で得られた因子の制御指針の有効性を確認することができた。

4.2　構造因子の制御指針の妥当性検証

（1）車体ねじり剛性向上因子の制御指針

逆解析の結果，部品断面の高さ方向を向上させ，幅方向を減少させるように制御することで，車体性能を向上することができると示唆している。これは，車体ねじりモードに対し，今回対象とする部品が上下曲げモードのみで車体変形を抑制するためであると考えられる（Fig. 13）。部品の曲げ剛性を向上するためには，材料因子である弾性率の向上と，形状因子である断面二次モーメントの向上が必要となる。部品断面高さに関する因子は断面二次モーメント向上に有効であることから，車体性能向上に寄与する因子として抽出されたと考えられる。

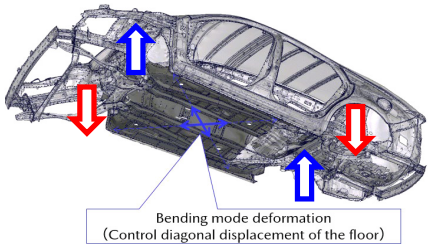


Fig. 13　Deformation Behavior of Car Body Torsion Mode

（2）フロア振動モードのモード減衰比向上因子の制御指針

フロア振動モードでは，Fig. 7 に示すようにフロア振動による部品取り付け面の面角度の変化に対し，斜めに横断するように部品構造を配置していることから，部品がねじりモードで変形していると考えられる（Fig. 14）。また，先行研究では，繊維強化樹脂の積層円筒で繊維配向角とねじり方向の減衰性との関係を評価した結果，ねじり軸に対し，0°もしくは 90°の一方向性材にすることで，ねじりの減衰性能を最大化できることが分かっている[(2)]。よって，部品のねじり剛性の制御により，ねじりモードの変形を許容することで，一方向性 CFRP のねじりの減衰性能を利用することを示唆していると考えられる。

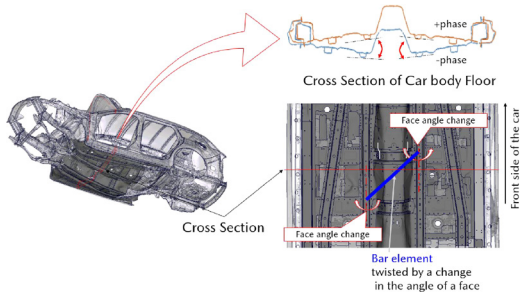


Fig. 14　Car Body Deformation Behavior and Bar Element Behavior in Floor Vibration Mode

（3）車体性能向上指針の妥当性検証

構築したモデルによって導出した，材料と構造の制御指針に沿って，材料は，樹脂内の相互作用を向上させた改良樹脂を適用した。また，車体剛性向上への寄与度が高い，繊維の剛性を向上させた。構造は，部品断面高さの確保を行いつつ，ねじり剛性の制御を行った。これら性能向上指針を織り込んだ CFRP 部品を作成し，効果検証を行った。

Fig. 15 に試験方法を示す。車体の固定は，ラバーマウントを介して実施した。フロントフレームを加振し，車体に取り付けた加速度ピックアップセンサーにより振動特性を評価した。なお，車体のねじり剛性評価は，加振試験で代用している。車体ねじり剛性が向上すれば，加振試験によって得られる車体ねじりモードの共振周波数が向上することから代用指標として使用した。減衰性能は，試験によって得られる周波数応答関数から，半値幅法によりフロア振動モードのモード減衰比を算出した。

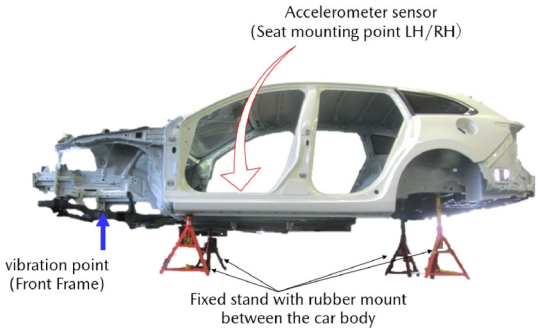


Fig. 15　Vibration Test by Car Body

実験結果を Fig. 16 に示す。逆解析で得られた構造の制御指針と，材料の制御指針を織り込むことで，部品の質量効率として，車体ねじり剛性を約 25%向上でき，フロア振動モードのモード減衰比を約 13%向上可能であることが確認できた。

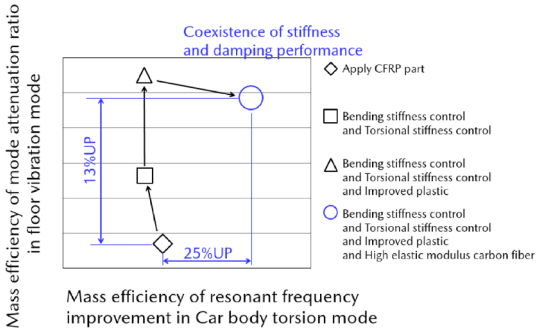


Fig. 16　Vibration Test by Car Body

5. おわりに

材料，部品，車体構造の各スケールのインプット（制御因子）とアウトプット（目的関数）を応答曲面法で構

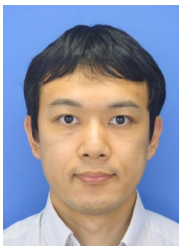
築したサロゲートモデルでつなぎ，順解析と逆解析ができる技術を開発した。これにより，材料特性が車体性能に与える影響を確認でき，目標とする車体性能を向上するために必要な部品と，材料の設計指針を導出できるようになった。

今回構築したモデルで導出した材料と構造の制御指針を参考に構造試作し，実験検証した結果，車体性能の向上が可能であると分かった。これにより，構築したモデルの有効性を確認できた。

参考文献

(1) 氷室雄也ほか：モデルベースリサーチ（MBR）による車両と材料をつなぐ解析技術の開発，自動車技術会春季大会前刷集，No.37-20（2020）
(2) 鮑力民ほか：FRP 積層円筒のねじり減衰特性，日本複合材料学会誌，Vol.28，pp.50-55（2002）

■著　者■


西田 健二

氷室 雄也

河村 力

本田 正徳

藤元 伸悦

論文・解説

27 ガウス過程回帰を用いたソフトセンサー技術に関する研究 ―エンジン筒内の空気充填効率の推定について―

Estimation of Air Charging Efficiency Using Gaussian Process

小川　史恵[*1]　桑原　一徳[*2]　平野　拓男[*3]
Fumie Ogawa　Kazunori Kuwahara　Takuo Hirano
目良　貢[*4]　和田　正義[*5]　松江　浩太[*6]
Mitsugu Mera　Masayoshi Wada　Kota Matsue

要　約

自動車エンジンの低排出ガス・低燃費化の鍵を握るのは，エンジン気筒内の空気量を高精度に予測することによる空燃比制御技術の実現である。 そのためにはさまざまな運転シーンにおいて，過渡的に複雑に変化する筒内の空気量をリアルタイムに把握することが必要である。筆者らはこの課題を解決するために，統計モデルである Gaussian Process（以下，GP と記す）を用いた推定技術について研究している。本報告では WLTC モード中の条件の下，GP を用いて空気量を予測するための説明変数の選択方法やそれによる推定結果について検討した結果を報告する。

Abstract

To achieve low emission and fuel consumption of vehicle engines, Air Fuel Ratio Control technology is a key technology, which accurately predicts the amount of air in engine cylinders. For the technology, it is necessary to recognize the amount of air in the cylinders in real-time, which transiently changes in a complex way according to driving scenes. We have been studying on estimation technology using a static model called Gaussian Process (GP). Here we report on our study: a selection method of choosing predictor variables for predicting air volume by using GP under WLTC mode, and the estimations.

Key words : Heat engine, Spark ignition engine, Theory/Modeling, Statistic modeling, Gaussian Process

1. はじめに

自動車エンジンの低排出ガス・低燃費化への関心が高まり，燃料をよりクリーンかつ効率的に燃焼する技術が求められている。その鍵を握るのは，エンジン気筒内の空気量を高精度に予測することによる空燃比制御技術の実現である。そのためには，さまざまな運転シーンにおいて過渡的で複雑に変化する筒内の空気量をリアルタイムに把握することが必要である。しかし一般的に，筒内の空気量を推定しようとしてもエンジンの構造上，筒内に空気量センサーを配置することができない。それに対応するために，物理方程式から求めたモデルを通して推定することが考えられるが，物理方程式は過渡的な変化を完全に記述することが困難なことが多い。すなわち実機の過渡実験データから，エンジン気筒内部において過渡的に変化する空気量の値を高精度に推定する技術の開発が課題である[(1)(2)]。

筆者らはこの課題を解決するために，統計モデルとして知られる Gaussian Process（以下，GP）を用いた推定技術について研究している。GP は，純粋に統計的な手法と比較して，非線形に強い利点を有している。加えて本技術を発展させることで，最小限のセンサー情報から他の多くの状態量をリアルタイムに推定できるソフトセンサーの実現にも貢献できる可能性がある。

本報告では WLTC モード中の低中速条件を中心に GP を用いて空気量を予測するための説明変数の選択方法や，それによる推定精度（相対誤差）について検討した結果を報告する。

[*]1,4　技術研究所
Technical Research Center
[*]2,3,6　パワートレーン開発本部
Powertrain Development Div.
[*]5　東京理科大学
Tokyo University of Science

2. 実験及び解析方法

2.1　データの取得方法

本節ではモデルとした内燃機関の装置について述べる。装置は排気量 1.997L，4 気筒の可変バルブタイミング機構を備える直噴ガソリンエンジンを用いた。ガソリンエンジンの空気の流れについて説明する。ここでは，エアクリーナーに吸入された空気がスロットルバルブを通じてサージタンク内に流入する。サージタンク内の空気は，クランクの回転に同期して開閉する吸気バルブを通じてシリンダー内に流入する。シリンダー内に流入した空気はシリンダー内に直接噴射される燃料と混合し，火花点火により燃焼する。燃焼後のガスは同じくクランク回転に同期して開閉する排気バルブを通じて排気管に排出され，排気ガスの浄化装置などを通過して大気に出される。

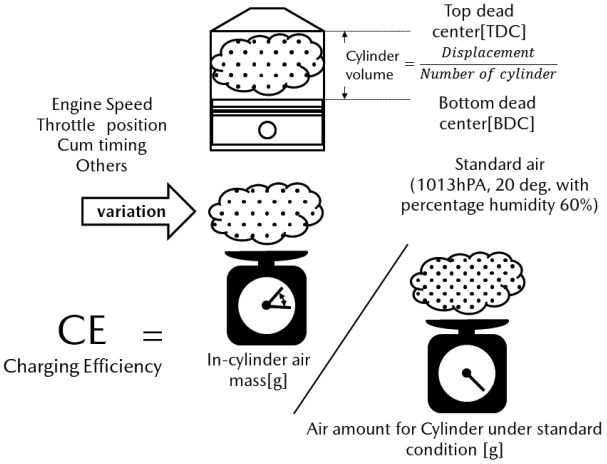


Fig. 1　Charging Efficiency

研究で着目したのは，上記一連の流れの中で筒内へ流入する空気の質量である。一般的に充填効率（Charging Efficiency：以下 CE と記す）というパラメーターで表される（Fig. 1 に示す）。CE は筒内に流入した空気の質量を，行程容積（1.997L/4 気筒＝0.499L）を占める標準空気（20℃，1atm）の質量で正規化した値である。この CE は一般に直接計測することが難しいため，推定量が用いられ推定には物理モデルや近似物理モデルで行われる。吸気系のダイナミクスを表現した物理統計モデルにおいては，エアフロセンサーやクランク角センサーを用いて計算するエンジン回転数など，多くのセンサー値を使用して各自動車メーカーが工夫を凝らしているところである。従って CE の推定精度を高めることやより少ないセンサー数，更には計算負荷の少ないアルゴリズムで推定が可能になる技術開発が重要である[(2)]。

本研究では，エンジンシステム（各センサー含む）及び 1 次元吸排気シミュレーションツールの解析値を用いている。Table 1 にエンジンの設定条件を記す。

Table 1　Technical Information

Drive system	Front wheel drive 6AT
Engine capacity	1.997L
Engine type	Water-cooled in-line 4cylinder DOHC 16valve engine
Compression ratio	13
Fuel type	Unleaded regular（91RON）

2.2　データの解析手法（Gaussian Process）

統計モデリングには，ガウス過程回帰を用いた（Gaussian Process，以下，GP）。GP に関するハイパーパラメーターは，入力する訓練データに基づいて最尤推定を行うことで決定する。ハイパーパラメーターにより，各データに対して時系列的な変化を表現する曲線（カーネル関数）を使ってモデル化できる。入力データ値によって何通りかの多項式を描けるが，最尤法を用いて 1 つのカーネル関数を使って表現されることが利点である。本手法は Rasmussen（1996）の論じるガウス過程が元になっている[(3)(4)]。

以下では GP の概要を述べる。$\boldsymbol{x}$ を説明変数ベクトル，y を目的変数とし，$\boldsymbol{x}$ と y を誤差項 ε とともに結び付けた関数モデル

$$y=f(\boldsymbol{x})+\varepsilon \tag{1}$$

をベイズ推定することを考える。$\boldsymbol{x}$ と y の n 組のペアからなる訓練用の観測データセット(2)式がサンプルとして得られたとする。

$$\{(\boldsymbol{x}_i,y_i)\mid i=1,2,\ldots,n\} \tag{2}$$

行列(3)とベクトル(4)を定義し，

$$\boldsymbol{X}=[\boldsymbol{x}_1,\boldsymbol{x}_2,\ldots,\boldsymbol{x}_n] \tag{3}$$

$$\boldsymbol{y}=[y_1,y_2,\ldots,y_n]^T \tag{4}$$

$$\varepsilon_i=y_i-f(\boldsymbol{x}_i)\ (i=1,2,\ldots,n) \tag{5}$$

誤差（観測ノイズ）の(5)においては互いに独立で同一の正規分布(6)式

$$\varepsilon_i\sim N(0,\sigma_n^2) \tag{6}$$

に従うことを仮定する。また，関数 $f(\boldsymbol{x})$ の実現値

$$f\mid\boldsymbol{X}=[f(\boldsymbol{x}_1),f(\boldsymbol{x}_2),\ldots,f(\boldsymbol{x}_n)] \tag{7}$$

においては適当なカーネル関数 $k(\boldsymbol{x},\boldsymbol{x}')$ を用いた対称行列(8)

$$\boldsymbol{K}=k(\boldsymbol{X},\boldsymbol{X})=\begin{bmatrix}k(\boldsymbol{x}_1,\boldsymbol{x}_1) & \cdots & k(\boldsymbol{x}_1,\boldsymbol{x}_n)\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ k(\boldsymbol{x}_n,\boldsymbol{x}_1) & \cdots & k(\boldsymbol{x}_n,\boldsymbol{x}_n)\end{bmatrix} \tag{8}$$

に基づき，平均ベクトル $\mathbf{0}$，分散共分散行列 $\boldsymbol{K}$ なる多変量正規分布(9)式に従うことを仮定する。

$$f|\boldsymbol{X} \sim N(0, \boldsymbol{K}) \tag{9}$$

すると，任意の点（検証用の説明変数ベクトル）x_* における y の予測分布については式(10)(11)(12)の形でベイズ推定することができる。

$$y_* \mid x_*, \boldsymbol{X}, \boldsymbol{y} \sim N(\mu_*, \sigma_*^2), \tag{10}$$

$$\mu_* = k(x_*, \boldsymbol{X}) \cdot (\boldsymbol{K}+\sigma_n^2\boldsymbol{I})^{-1}\boldsymbol{y}, \tag{11}$$

$$\sigma_*{}^2 = k(x_*, x_*) - k(x_*, \boldsymbol{X}) \cdot (\boldsymbol{K}+\sigma_n^2\boldsymbol{I})^{-1} k(\boldsymbol{X}, x_*) \tag{12}$$

ここに，μ_* は予測平均，σ_*^2 は予測分散，$k(x_*, \boldsymbol{X})$ は

$$k(x_*, \boldsymbol{X}) = [k(x_*, x_1), \ldots, k(x_*, x_n)] = k(\boldsymbol{X}, x_*)^T \tag{13}$$

を表す。上記の μ_* が特に y の x_* における（平均的な）推定値を与えており，

$$\boldsymbol{\alpha} = [\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_n]^T = (\boldsymbol{K}+\sigma_n^2\boldsymbol{I})^{-1} \tag{14}$$

とおけば(15)式のように表すことができる。すなわちカーネル関数の線形結合であることを示している。

$$\mu_* = \Sigma_{i=1}^{n} \alpha_i \cdot k(\boldsymbol{x}_*, \boldsymbol{x}_i) \tag{15}$$

以上を踏まえ，ここでは関数 $f(x)$ を具体的に

$$f(\boldsymbol{x}) = \Sigma_{r=1}^{m}\{a_r \cos(2\pi \boldsymbol{s}_r^T \boldsymbol{x}) + b_r \sin(2\pi \boldsymbol{s}_r^T \boldsymbol{x})\} \tag{16}$$

（ただし，係数ベクトル $\boldsymbol{s}_r$ や基底関数の個数 m はハイパーパラメーター）なる特別な形として取扱うことにし，計 $2m$ 個ある a_r, b_r $(r=1, 2, \ldots, m)$ については互いに独立で同一の正規分布(17)

$$a_r, b_r \sim N\left(0, \frac{\sigma_0^2}{m}\right) \tag{17}$$

に従った乱数を発生させることにより定義する。実際このように取扱えば $f|\boldsymbol{X}$ は平均ベクトルが $\mathbf{0}$ であり，分散共分散行列がカーネル関数(18)

$$k(\boldsymbol{x}_i, \boldsymbol{x}_j) = \frac{\sigma_0^2}{m} \Sigma_{r=1}^{m} \cos\left(2\pi \boldsymbol{s}_r^T (\boldsymbol{x}_i - \boldsymbol{x}_j)\right) \tag{18}$$

を共分散にもつ $\boldsymbol{K}$ であるような多変量正規分布に従う一例として構成することができ，上記に述べたとおり，任意の点 x_* における y の推定値を μ_* として得ることができる。Table 2 に計算条件を示した。

Table 2　GP Simulation Parameters

Name	Parameter Setting
Kernel as subset size (m)	50
Number of Iteration	100
Minimum Time Lag Inputs/Outputs	0,1
Max Time Lag Inputs/Outputs	2/2, 5/5, 10/10
Kernel function	Trigonometric

2.3　検証内容

一般的に GP を用いた過渡モデリングは①データ収集，②データ前処理，③モデル構築，④モデル検証のプロセスで開発される。本報告では特にモデルの精度に影響が大きいと考えられる①②のプロセスに着目し目的関数を表現する時系列データの加工方法と，説明変数の選択方法について検証する。

3. 結果

3.1　時系列データ解析における諸検証

（1）データの分割

GP を用いた検証に当たり，Fig. 2 のように合計 600 秒間からなる車両の走行データに対し，半分の 300 秒を訓練データ，残りを検証データと割り当てた。訓練データに対して分割周期の変更を行い，検証データを入力し検証を行った。

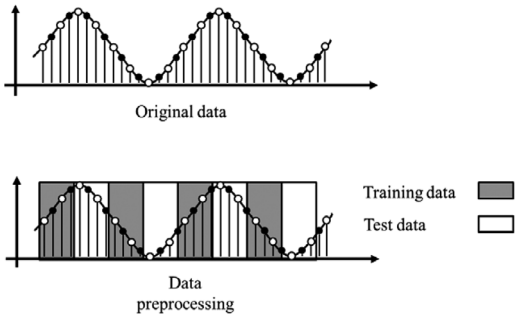


Fig. 2　Conceptual Diagram of Preprocessing

（2）Lag についての検討

本検証で使用しているような時系列データの性質をつかむためには，統計量の算出が重要である。統計量の指標としては，自己相関関数や偏自己相関関数がある。これらは時系列データにおける各時刻のデータが，時間差を設けてずらしたデータとどれだけ相関関係にあるかを定量化する指標である。時系列データでは観測値と観測した時間が逐次記録されており，各観測した時点の関係性（前後関係）に意味がある。本研究では時系列データのもつ時間差の度合いである Lag（ラグ）に注視し，時点をずらして算出した自己相関関数を用い検証の指標とした。

なお GP 回帰に使用したソフトウェア ASCMO では Lag について仮説を立てやすくするため，Fig. 3 に示すように逆自己相関関数 IACF（Inverse Autocorrelation Function）と呼ばれる指標を参照している[(5)]。横軸に時間の Lag，縦軸に IACF を示しておりゼロに収束していく IACF の出力結果を参照しつつデータごとの Lag を検討するのが望ましいとされている。本結果より，Lag が 0，1 を中心に相関を持ち 2 以上の場合でも影響を受けていることが示唆される。そのため Lag をここでは大まかに 0,2,10 と仮定して後節で検証した[(6)]。

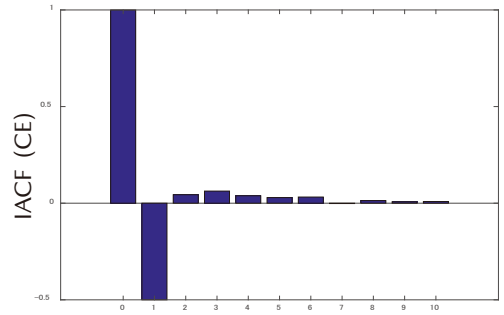


Fig. 3　Result of Inverse Autocorrelation Function

3.2　説明変数の選択方法に関する検討

説明変数の選び方について検討した結果を示す。推定する目的変数はCE，真値はECUで得られるCE値とした。説明変数は(a)～(c)の考え方に従い選択し，後述するk-fold cross validation法を用いてモデル精度を比較検証した。

(a) 物理的センサーから取得できる全ての因子（気筒近傍の全てのセンサー値）を説明変数にした場合
(b) 機械の状態に関するセンシング値と，CEとの因果が強い温度に関連する因子のみを説明変数とした場合：エンジン回転数，スロットル開度，カムタイミング（インテークバルブ／エギゾーストバルブ）＋温度
(c) 機械の状態に関するセンシング値のみを説明変数とした場合：エンジン回転数，スロットル開度，カムタイミング（インテークバルブ／エギゾーストバルブ）

適合度指標をTable 3に，解析結果をFig. 4にそれぞれ示す。Fig. 4の黒線は訓練データ，青線は推定値である。検証にはk-fold cross validation（k分割交差検証）を用いた。これはkセットに分割されたデータ内の1セットを除いたデータで学習して，回帰モデルを構築して残りの1セットで検証するものである。本検討では分割数k＝4とした。すなわち，元の時系列を計4つの区間に分割して取扱うことを意味する。結果は全てRMSEが0に近い場合をよい変数の選び方として評価する。

Table 3　Output of 4-fold Cross Validation

(a)

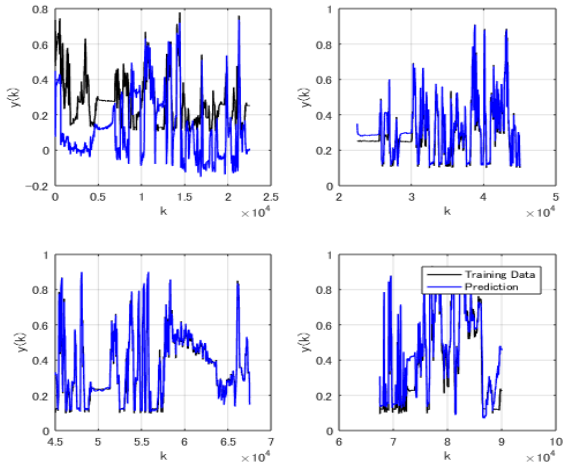
RMSE: 0.23085 R^2: −1.70510	RMSE: 0.03145 R^2: 0.98071
RMSE: 0.02273 R^2: 0.98536	RMSE: 0.07971 R^2: 0.91062

(b)

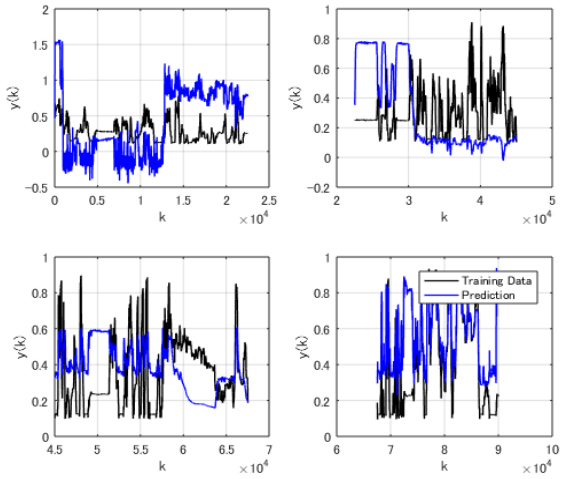
RMSE: 0.48899 R^2: −11.1373	RMSE: 0.34740 R^2: −3.79630
RMSE: 0.21922 R^2: −0.36169	RMSE: 0.23634 R^2: 0.21436

(c)

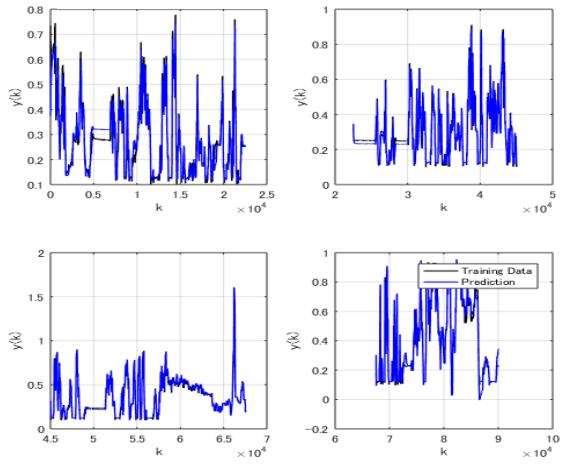
RMSE: 0.02326 R^2: 0.97254	RMSE: 0.01459 R^2: 0.99154
RMSE: 0.05716 R^2: 0.90742	RMSE: 0.03863 R^2: 0.97901



(a) For All Parameters Modeling



(b) For Thermal Parameters Modeling



(c) For Vehicle Speed， Throttle Position and Cam Timing Modeling

Fig. 4　Output of 4-fold Cross Validation

上記の結果から特に（c）のケースにおいて，全ての検証データで R^2 が高く確保され統計モデルの説明変数の選択として妥当と判断した。また，GP では多くの説明変数を与えると逆に推定精度が低下することを把握した。

（a）や（b）での推定精度が低い理由として，（a）のケースでは過度に多くの変数を含むため，逆行列計算に特異な影響が出てしまい推定精度が低下したことが考えられる。（b）については（c）の変数に追加して温度の変数を更に加えることで計算したが（c）の変数の中で温度との相関関係が生じたことによる影響で，（b）のケースでは多重共線性が排除できなくなったと考える。

3.3　遅れ要素を考慮したフィルター処理の検討

一般的に内燃機関における制御は，エアフロセンサー（AFS）をエンジンの吸気系上流に配置することで気筒に充填される大まかな空気量を計測できる。ただ，気筒内内部や近傍にセンサーを配置できないことを先に述べた。そのため，これまでの経験から CE を正確に把握するには AFS から気筒までの吸気経路分の遅れ要素を考慮するとよいとされてきた。

そのため本節では，遅れ要素を表現できる LPF（ローパスフィルター）やダウンサンプリングを検討した。なかでもダウンサンプリングは LPF のような特性をもつことが知られている。

Fig. 5 では Lag2 の場合の CE の推定値を示した。

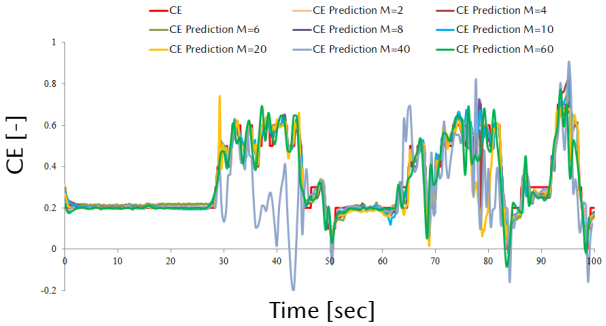


Fig. 5　Comparison of Prediction for Down Sampling with Lag＝2

ダウンサンプリングの方法としてはデシメーション（間引き）を実行する。目的変数（CE）を表す y に関するダウンサンプリング前の信号を $y\,[t]$，後の信号を $y\,[M \cdot t]$ とする。M はダウンサンプリング比と呼ぶ。$y\,[t]$ の実際のデータ $y_i\,(i = 1, 2, \ldots, n)$ は各時刻 $t = i\Delta t$（Δt は時間刻み幅［sec］を表し，本検討では $\Delta t = 0.01$ である）における値をもち，ダウンサンプリングにより得られる $y\,[M \cdot t]$ の実際のデータ $y_{i'}$（$i' = 1, 2, \ldots, n'$）は各時刻 $t = i'\,M\Delta t$（$M\Delta t$ が時間刻み幅［sec］）における値をもつことになる。信号を間引くことで時系列データのもつ周波数スペクトル成分が変化する。つまり一部の信号列がゼロ値に置き換わり，従来は生じていないデータ上にもノイズが生じることがある。M が低下すると，隣に接するスペクトル同士が近づく。M が大きくなるとエイリアシングが起きる傾向もみられる[7]。そのためダウンサンプリング比を選択して用いることは，真値に対する推定において効果的と考えられる。Fig. 6 では，$M＝40$（すなわち，$M\Delta t＝0.4$ [sec] 刻み）に設定すると推定精度が低下した。この要因は隣接する元のデータ同士が相互に影響したためと考えられる。説明変数と目的変数それぞれでスペクトルの変化が伴い推定精度に影響が出るため，適切な M の値を選ぶ必要がある。今回は Lag＝2 のみの結果であるので，次節では Lag の条件を変えて検討を行うこととした。

3.4　Lag の変化に伴う統計モデルの推定精度

本節では CE の推定を Table 1 のエンジン諸元及び Table 2 の計算条件の下で，Lag 違いの解析を行った。結果を Fig. 6 へ示す。

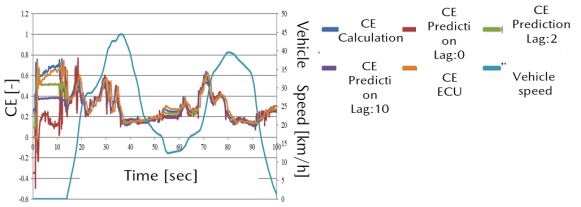


Fig. 6　Comparison of Prediction for Some Lag Values

同図では Lag＝0，2，10 を比較して縦軸の左側が CE，右側が車速を示している。CE 計算値（青）は AFS 取得の流量瞬間値と CAE で計算した CE から推測した値でありこれを真値とした。 ECU による出力値である CE（橙）と比較すると，GP で推定した CE に比べて若干の時間遅れが生じている。GP による推定値と各 Lag を比較すると横軸の時刻 20 [sec] 以上から 50 [sec] までは，どの Lag においても CE 値が推定値とほぼ一致していた。ただし比較的急峻な加速シーンにおいて，Lag の値を 10 で推定させると再現性が低いことがわかった。一方で Lag を 0 とした場合では，走行開始してから若干の上限振動はあるがほぼ追随して真値に近い推定値を保っていた。

3.5　統計モデルの活用法に関する考察

以上の結果から下記のことが考察できる。

走行パターンを考慮して内燃機関を併用させる車両の場合 Lag が大きい場合には CE 値の推定精度が低くなるため，急峻な加速シーンにおいては IG-ON（エンジン始動）と連携させて考える必要がある。例えば制御の ON が入った後，50ms（0.05sec）～1sec 以降にランプ（始動までの勾配部分のこと）なしで推定開始するのではなく，計算のための予備の時間としてランプ期間を設けるのが効率的と考える。

また，燃料の濃度の配慮も必要であると考える。例え

ば理論空燃比からの逸脱にある程度の閾値などを設け使用することが妥当だと考えるが，フューエルカット復帰時や吸入空気量が少ない時は更に注意が必要である。その理由は，フューエルカット中は筒内の既燃ガスが空気に置換するために空気量が通常運転と数十%程度異なり，また吸入空気量が少ない場面では空気量の予実差によりそれぞれ A/F が理論空燃比から大きく逸脱してエンジンは失火してしまうことになるからである。従って，燃料の濃度についてはリーンかつリッチであっても閾値を設けてモデルを動作させるのがよい。

更には，Lag を 0 以外に設定することだけでなく，車速が一定とならない領域を十分長く確保できるシーンにおいて Lag の変化も考慮しつつ GP による統計モデルを学習させることが重要であると考えられる。これらを踏まえ，Fig. 3 に示す指数関数的に最小値を示した Lag＝10 とそのほかの Lag 値の設定を最適化しながら GP モデルを活用すれば，安定した制御を求めることができると考える。

以上のように統計モデルの推定精度は，説明変数の選択やデータの前処理などに大きく影響を受ける。これらを適切に設定しながらモデルの精度を正しく把握し，制御モデルへの反映可否を検討していくことが重要である。特に燃料のリーン状態などでは，推定精度を出すのが難しく，GP モデルの適用が限定的となる可能性も考えられる。

4. まとめ

本研究ではエンジン気筒内の空気量を高精度に予測するため，統計モデルである GP の適用方法を検討し，説明変数の選び方や時系列データの Lag 設定がモデル精度に対して重要となることを述べた。本検討結果はエンジンを対象とした統計モデリングの手法の一つとして有効であり，モデル作成のためのデータ群を学習させる上では車両の運動状況も重要であることがわかった。

今後も更なる低排出ガス・低燃費化の実現に向け，統計モデルによる CE 推定精度を更に向上させる。それと並行して，広く他の課題にも適用できるように，本技術を基に汎用的な統計モデル化の技術基盤に発展させていきたい。

参考文献

(1) R. Benedikt: Local Gaussian Process Regression in order to Model Air Charge of Turbocharged, Gasoline S5-Engines，2016-01-0624，04/05/2016, BMW（2016）

(2) 船津，金子：ソフトセンサー入門―基礎から実用的研究例まで―，（2014）

(3) Christopher Bishop: Pattern Recognition and Machine Learning, Springer（2006）

(4) Carl Edward Rasmussen and Christopher K. I. Williams: Gaussian Processes for Machine Learning，MIT-Press（2006）

(5) Ette Harrison Etuk: On Autogressive Model Identification, Journal of official Statistics, Vol.4, No.2, pp.113-124（1988）

(6) 小川，清水，和田：ガウス過程を用いたガソリンエンジンの吸入空気量推定における 統計モデリング手法の開発」，自動車技術会論文集，2019 年 50 巻 2 号，pp.260-266（2019）

(7) 足立：ユーザのためのシステム同定理論，コロナ社（1993）

付録

R^2（Coefficient of Determination）

モデルの誤差を評価するための相対的な指標，全部の測定データの平均値に対する分散とモデルに対する分散の比を示す。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_{i,predictive} - y_{i,true})^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_{i,measure} - \bar{y}_{i,true})^2}$$

$y_{i,predictive}$：推定値，$y_{i,true}$：真値

$\bar{y}_{i,true}$：真値の平均，n：測定データの数

RMSE（Root Mean Square Error）

平均化された誤差の値を表す。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_{i,predictive} - y_{i,true})^2}{n}}$$

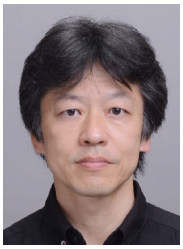
■著　者■

小川 史恵

桑原 一徳

平野 拓男

目良 貢


和田 正義

松江 浩太

論文・解説

28

無次元数による噴霧の分裂特性の統一的整理

Unified Expression of Spray Breakup Characteristics Using a Non-dimensional Quantity

倉持　晃 *1　原田　雄司 *2　永澤　健 *3
Akira Kuramochi　Yuji Harada　Takeshi Nagasawa
瀬戸　祐利 *4　山下　洋幸 *5
Masatoshi Seto　Hiroyuki Yamashita

要　約

内燃機関の高熱効率化に加え，ゼロインパクトエミッション（ZIE）化及びカーボンニュートラル（CN）燃料への対応が急務となっている。多種多様な燃料において高い熱効率と ZIE 化を両立するためには，各種液体噴霧の分裂特性に基づいて，エンジン燃焼室内の混合気濃度分布・温度分布を精密に制御することが重要となる。本研究では，噴霧の分裂特性に深く関係する分裂長さに着目し，多種多様な液体噴霧の分裂長さを統一的に整理可能な指標構築に取組んだ。気液の相対速度を考慮した慣性力と表面張力の比を表すジェット数，噴霧先端速度と噴孔直径，雰囲気気体の動粘性に基づく気相レイノルズ数，及び液体の潜熱顕熱比を表す無次元量によって，液体種，噴孔諸元，雰囲気環境それぞれが異なる噴霧の分裂長さを統一的に整理できることを示した。

Abstract

In recent years, there has been a social demand for internal combustion engines with high thermal efficiency, zero impact emissions (ZIE), and carbon neutrality (CN). In order to satisfy the demands, it is important to control in-cylinder mixture concentration/temperature distributions, precisely, based on breakup characteristics of liquid sprays under various environments. In this study, we focused on non-dimensional quantities that represent the breakup lengths of various liquid sprays in a unified manner. The results showed that a breakup length was able to be uniformly expressed by non-dimensional quantities composed of Jet numbers, Reynolds numbers, and non-dimensional quantity representing the ratio of latent heat to sensible heat under various injector specifications, liquid types and ambient conditions.

Key words : Heat engine, Fuel, Fuel injection, Spray breakup, Breakup length, Water injection, Biofuel

1. はじめに

内燃機関の高熱効率化に加え，排気中の環境負荷物質含有率を大気同等とするゼロインパクトエミッション（ZIE）化，排出 CO_2 量を正味ゼロとするカーボンニュートラル（CN）化への対応も急務の課題となる。ガソリンや CN 対応燃料を適用したエンジンにおいても，高い熱効率と ZIE を両立するためには，各種噴射液体の分裂速度，分裂後液滴の空間分布等に代表される分裂特性に基づいた筒内混合気濃度／温度分布の精密な制御が重要である。また筒内の混合気温度分布制御に関しては，水噴霧の活用も想定される[(1)(2)]。よって，高熱効率化及び ZIE 化，更には CN 化へ迅速に対応するためには，多様な雰囲気環境や噴孔諸元，水を含むさまざまな液体種において，噴霧の分裂特性を精度よく予測可能かつ重要な物理法則に則った簡易モデルの構築を進める事が重要となる。

分裂長さは，噴霧中に存在する液体の分裂状態，及び噴霧の巨視的な空間的発達挙動／空間分布特性を考察する上で重要な物理量であり，噴霧の分裂特性を代表するパラメーターの一つである。この分裂長さについては，Levich の分裂理論に基づいた簡便なモデルが提案されており，式(1)で表される[(3)]。

$$L_b = C_b D_n \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}} \quad (1)$$

L_b は分裂長さ，ρ_l は液体密度，ρ_g は雰囲気気体の密度，

*1　パワートレイン技術開発部
Powertrain Technology Development Dept.
*2〜5　技術研究所
Technical Research Center

D_n は噴孔直径，C_b はモデル定数である。しかし，式(1)を多様な液体種や雰囲気環境に適用するためには，液体種や雰囲気条件ごとにモデル定数 C_b について，都度キャリブレーション試験を実施する必要がある。そのため，ガソリンや軽油のみならず，多様な CN 燃料を内燃機関へ適用することが想定される環境において，適切な筒内混合気制御を迅速に検討するためには，これまで以上に一般性を有する分裂長さモデル構築の必要性が増してくる。有次元の物理量を一般化する手法として，無次元数及びそれを利用したダイアグラムがしばしば用いられている。そこで本研究では，さまざまな雰囲気場における各種液体噴霧の分裂長さについて，無次元量を活用したその汎用モデルの構築を試みた。まず，噴霧可視化試験結果に基づき水及びガソリン模擬燃料（S5R[(4)]）噴霧の分裂長さを分析した。そして，種々の噴孔諸元，噴射圧力，液体種，雰囲気環境における噴霧の分裂長さに関する既往研究結果を収集した。その上で，それらの結果を統一して整理可能な無次元量を，分裂に寄与する物性・物理過程の考察に基づき導出した。

2. 実験装置，実験条件及び解析手法

2.1　実験装置，実験条件

定容容器内において，単噴孔及び多噴孔ホールインジェクターを用いて液体噴射を行い，容器内で形成される自由噴霧の発達過程を高速度カメラにより可視化した。なお噴射液体とその分裂・蒸発の進展に伴う噴霧混合気形成挙動をとらえるため，気相・液相両者の空間密度勾配と噴霧概形を時系列的かつ比較的簡便に観測可能なシュリーレン法を採用した。定容容器内に，$Ar/N_2/O_2/C_3H_8$ 予混合気をあらかじめ充填し，火炎伝ぱ燃焼させることで，容器内雰囲気をエンジン筒内環境相当の高温・高圧状態を実現した。なお上記予混合気の成分割合は，容器充填時にねらいの密度となるよう調整した。そして，充填予混合気の燃焼後に容器内部雰囲気がねらいの温度及び圧力条件に達した時刻に，液体噴射を行った。実験方法及び装置の詳細については，文献[(1)] を参照されたい。得られた噴霧可視化映像から各時刻における噴霧先端到達距離を求め，その値に基づき各種液体噴霧の分裂長さを解析した。

Table 1 に使用したインジェクター諸元を示す。供試インジェクターには，ソレノイド駆動式ホールインジェクターを用い，各々の噴孔仕様を改造した。

Table 1　Specification of the Baseline Injectors

Injector type	Solenoid-Driven Injector		
Hole number	1	9	1
Hole diameter [mm]	0.08	0.08	0.10
Nomenclature	Inj. A	Inj. B	Inj. C

Table 2 は，試験を行った際の容器内雰囲気条件である。噴霧の分裂過程においては，噴射する雰囲気場の密度及び温度が大きな影響を及ぼす。そのため，高温・高圧となるエンジン燃焼室内での噴霧分裂挙動を模擬するために，Case 1，2 それぞれの密度及び温度条件は，各々圧縮比 20 以上の自然吸気エンジンにおけるクランク角 20［deg. bTDC］，5［deg. bTDC］の筒内密度，温度を模擬するように設定した。

Table 2　Ambient Conditions of the Experiment

		Case1	Case2
Density [kg/m^3]		9.47	17.4
Pressure [MPa]		2.02	4.40
Temperature [K]		910	1070
Gas component [mole fraction, %]	Ar	73.2	72.0
	N_2	9.4	13.1
	H_2O	9.9	8.5
	CO_2	7.5	6.4

Table 3 に，噴霧可視化試験を実施した噴射条件と雰囲気条件を示す。噴射期間は，インジェクター及び噴射圧ごとに，定常的に噴霧が形成される期間が観察できる時間幅に設定した。

Table 3　Summary of the Test Conditions

Test fluid	Water (293 [K])				S5R (293 [K]) (gasoline surrogate fuel)
Injector	Inj. A	Inj. B	Inj. C		Inj. C
Injection pressure (rail pressure) [MPa]	130 200	60 130 200	20	100 200	100 200
Injection pulse width [ms]	0.5	0.5	3	0.5	0.5
Ambient condition	Case 1	Case 1	Case 1, 2	Case 1, 2	Case 1, 2

2.2　分裂長さの解析手法

噴霧先端到達距離は，噴射初期においては時間に比例し，噴射開始から時間が経過し準定常となった状態においては時間の 0.5 乗に比例することが知られている[5][6]。本研究では，噴霧の発達状態が非定常状態から準定常とみなせる状態へと遷移する際の噴霧先端到達距離を分裂長さと定義した。これに基づき本研究での噴霧可視化試験及び既往研究から得られた噴霧先端到達距離の経時発達特性から，分裂長さを解析した。Fig. 1 に本研究における分裂長さの定義を図示する。以下に示す式(2-1)，(2-2)について，α，β をフィッティングパラメーターとして，噴霧先端到達距離 S の時系列データに対するフィッティングカーブを導出し，それらの交点における噴霧先端到達距離を分裂長さとした。

$$S=\alpha t \tag{2-1}$$

$$S=\beta\sqrt{t} \tag{2-2}$$

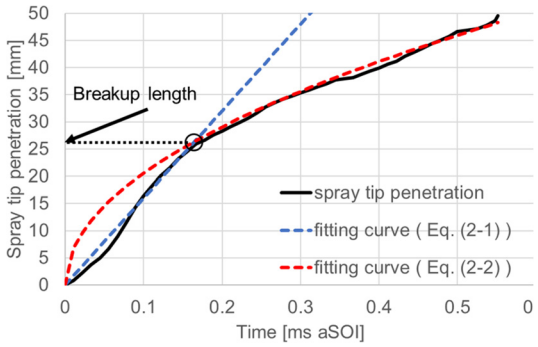


Fig. 1　Definition of the Breakup Length

3. 結果と考察

3.1　分裂過程に関連する無次元数

Fig. 2 に，各条件下にて計測した噴霧の分裂長さ解析結果を示す。横軸は噴射圧力，縦軸は分裂長さである。Fig. 2 中に記載のない計測条件については，可視化視野範囲内において，噴霧の発達挙動が準定常状態へ遷移せず，分裂長さの解析が不可能であった。

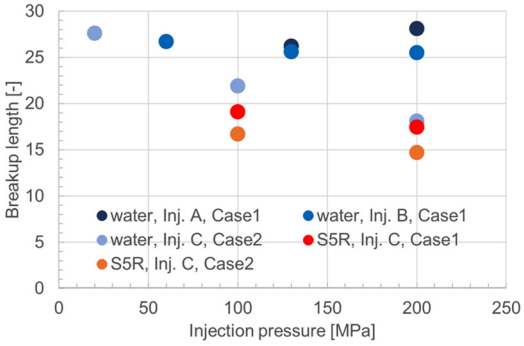


Fig. 2　Breakup Length Against the Injection Pressure

ここで，雰囲気場，及び液体種のそれぞれが分裂長さに及ぼす影響を独立して比較可能な Inj. C による噴霧の分裂長さを対象に，ジェット数による整理を試みた。ジェット数は，液体噴流の分裂特性を評価する量としてしばしば用いられており[7]，式(3)の形で表される，気液の相対速度を考慮した慣性力と表面張力の比を表す無次元数である。

$$Je=\left(\frac{\rho_l D_n V_{tip}^2}{\sigma_l}\right)\left(\frac{\rho_{amb}}{\rho_l}\right)^{0.55} \tag{3}$$

ρ_{amb} は雰囲気場の密度［kg/m^3］，ρ_l は噴射液体の密度［kg/m^3］，D_n はインジェクターの噴孔直径［m］，V_{tip} は噴霧先端速度［m/s］，σ_l は液体の表面張力［N/m］である。Inj. C における噴霧の分裂長さとジェット数との関係を，Fig. 3 に示す。なお次元を一致させるため，縦軸には，分裂長さを噴孔直径で無次元化した，無次元分裂長さを記載している。液体種，及び雰囲気条件が同一であれば，無次元分裂長さはジェット数の対数に線形依存する傾向がある。この結果から，適用可能範囲は限定的であるものの，ジェット数は，液体の分裂過程に寄与する代表的な物理量の関数であることがわかる。一方で，同程度のジェット数であっても，Case 1 及び Case 2 環境下の S5R 噴霧の無次元分裂長さを比較すると，Case 1 よりも高温かつ高密度である Case 2 条件の方が短い。更には，水噴霧と S5R 噴霧とでは，S5R 噴霧の無次元分裂長さが短い傾向にある。この結果からは，噴霧の分裂長さには，ジェット数にて考慮している物理量以外に，依存性をもつ物理量が存在することを示唆している。以上のことから，ジェット数に加えて，液体の分裂過程に関与する主要な物理量を代表する無次元量を組み合わせることで，多様な噴霧の分裂長さを包括的に表現可能ではないかと考えた。

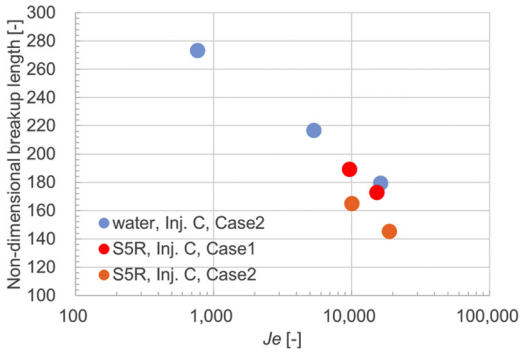


Fig. 3　Non-dimensional Breakup Length of the Inj. C Spray Against the Jet Number

ここで，Fig. 4 に，噴霧の分裂特性に寄与する現象と関連する物理量の相関図を示す。インジェクターから噴射された液体は，主に雰囲気場との速度差，密度差による不安定性の励起により，その表面が変形する。そして，

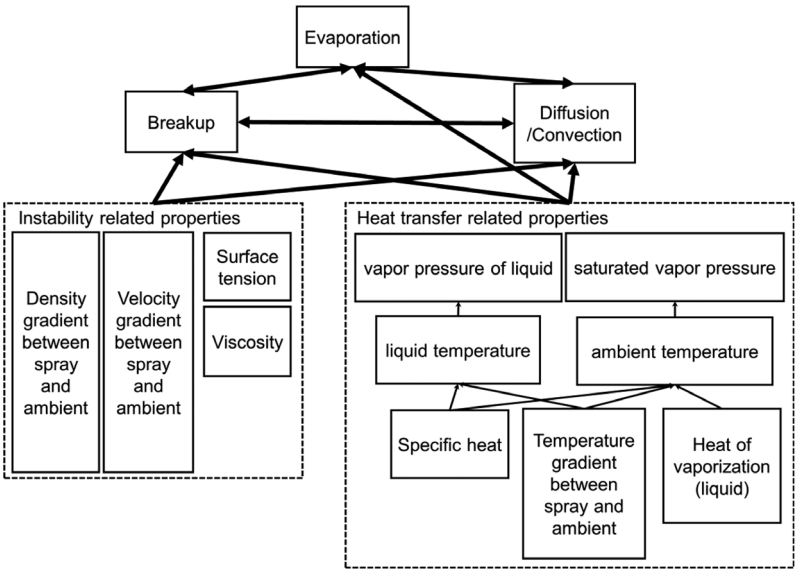


Fig. 4　Breakup and Evaporation Process of Liquid Spray

その変形を阻害する物理作用（液体の表面張力や粘性）の影響を受けつつ，最終的に分裂へと至る。一方で気液間の熱交換は，噴射直後から生じており，気液間熱交換により生じる液体の昇温及び気化は，液体周囲の気体の温度，ひいては密度や粘性の変化をもたらすために，液体の分裂過程にも影響を及ぼすことが予想される。ジェット数に加えて，上述の物理量各々が噴霧の分裂に及ぼす影響を評価する無次元数を組み合わせることで，多様な噴霧の分裂特性を評価可能であると考えられる。これ以降，ジェット数に加えて考慮する無次元数に関して，検討した内容を記述する。

新城らによる高速噴流の噴射初期段階における分裂機構解析[8]により，噴射初期の液柱表面では，壁乱流遷移に類似した気相境界層の不安定化が生じていること，また噴射初期の液柱コアに形成される表面パターンの位相速度が Tollmien-Schlichting 波の位相速度に一致することが確認されている。Tollmein-Schlichting 波の増幅／減衰傾向は，流体のレイノルズ数に相関をもつ[9]。したがって，噴流の噴射初期段階における不安定性の成長には，気相の物性に基づくレイノルズ数が重要な影響を及ぼすものと考えられる。すなわち，噴霧の初期分裂過程においては，式(4)で表現する気相の物性に基づくレイノルズ数が支配的となり現象が進行すると推測される。

$$Re_{amb} = \frac{V_{tip} D_n}{\nu_{amb}} \tag{4}$$

ここで，ν_{amb} は雰囲気の動粘性係数［m^2/s］である。

気液間の熱交換による，液体の温度上昇，液体の蒸発，及びそれらに起因する周囲気体の温度低下は，分裂機構に関与する気液双方の粘性や，液体の表面張力，気液間の密度勾配に変動をもたらす。そして気液間を移動する熱量は，気液の温度差，比熱及び蒸発潜熱に依存する。ヤコブ数を参考にして，上記の熱交換による熱移動量及びそれに伴う物性変動量を代表させる無次元量を，以下式(5)のように定義した。

$$Ja_{sp} = \frac{C_{pl} \left| T_{amb} - T_l \right|}{h_{lg}} \tag{5}$$

C_{pl} は噴射液体の比熱［J/(kg･K)］，T_{amb} は雰囲気の温度［K］，T_l は噴射液体の温度［K］，h_{lg} は噴射液体の蒸発潜熱［J/kg］である。式(5)中の分子は，雰囲気から噴射液体へと供給される熱量により生じる液体のエンタルピー変化に対応し，分母は噴射液体が気化する際に周囲気体から奪う熱量に対応する。無次元量 Ja_{sp} を，液体の分裂過程における気液間熱交換の影響に関係する無次元数として用いる。

ジェット数に加えて，式(4)，(5)にて示した無次元数を組み合わせることで，Fig. 4 に示した気液の速度差，密度差，表面張力，粘性，気液間の熱交換といった各種物性及び現象が，噴霧の分裂長さへ及ぼす影響を考慮できると推測される。また Fig. 4 に示した物理現象は相互に影響を及ぼしつつ進行する。そのため，ジェット数 Je，気相レイノルズ数 Re_{amb}，無次元量 Ja_{sp} のそれぞれを個々に評価するのでなく，それらの積を，分裂過程に関わる一連の物理過程とその相互作用を包括する無次元量と考え，無次元分裂長さの予測式を構築した（式(6)）。

$$\frac{L_b}{D_n} = a_0 (Je \times Re_{amb} \times Ja_{sp})^{a_1}$$

$$= a_0 \left(\left(\frac{\rho_l D_n V_{tip}^2}{\sigma_l} \right) \left(\frac{\rho_{amb}}{\rho_l} \right)^{0.55} \times \frac{D_n V_{tip}}{\nu_{amb}} \times \frac{C_{pl} \left| T_{amb} - T_l \right|}{h_{lg}} \right)^{a_1} \tag{6}$$

なお a_0，a_1 は，実験定数であり，非線形回帰により決定する。

3.2　分裂長さ予測式の精度検証

本研究において分析した水及び S5R 噴霧の分裂長さに

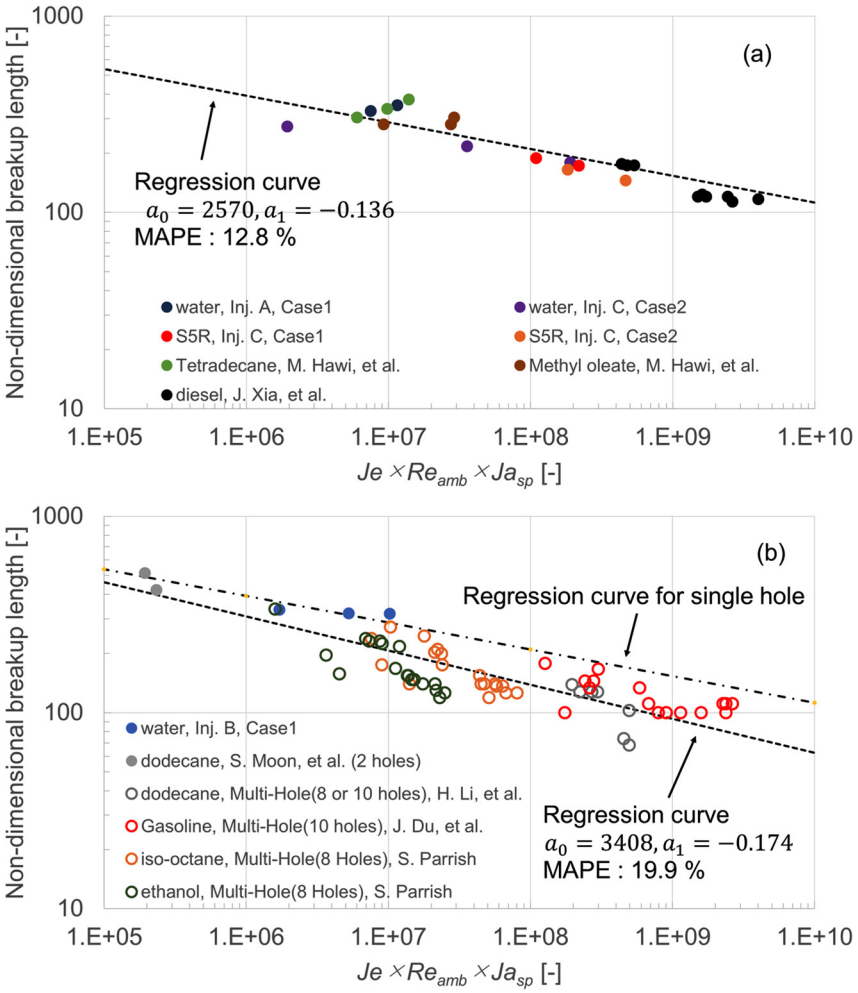


Fig. 5　Dependence of the Non-dimensional Breakup Length on the $Je \times Re_{amb} \times Ja_{sp}$
（a）Single Hole Injector Spray（b）Multi Hole Injector Spray

加え，種々の噴孔諸元，噴射圧，液体種，雰囲気環境における噴霧分裂長さを既往研究報告[10)－15)]から分析し，多様な環境下での噴霧分裂長さを対象に，式(6)の予測精度を検証した。なお式(6)の諸量の計算に際して，液体の物性値について文献中に記載がない場合はBronkhorst社が公開している液体物性データベース[16)]を参照した。雰囲気の動粘性係数については，予燃焼雰囲気場での計測データでは主要な希釈気体を，窒素充填雰囲気場では窒素を，それぞれ雰囲気の代表成分として，サザーランド式により算出した。

単噴孔及び多噴孔の分裂長さを対象に，式(6)を用いて回帰分析を行った結果をFig. 5に示す。Fig. 5(a)が単噴孔噴霧を対象とした回帰結果，Fig. 5(b)が多噴孔噴霧を対象とした回帰結果である。単噴孔噴霧の無次元分裂長さを予測対象としたとき，式(6)による予測値の平均絶対誤差率（MAPE）は12.8%とよい精度が得られた。多噴孔を対象とした時，MAPEは19.9%と単噴孔対象時と比較して精度が悪化している。そして，多噴孔噴霧の無次元分裂長さは，単噴孔噴霧の値と比べ短い。多噴孔化に伴う予測精度の悪化及び無次元分裂長さ短縮の要因としては，噴霧間干渉，すなわちコアンダ効果に起因する噴霧先端速度の減少が考えられる。コアンダ効果による噴霧先端速度低下作用を受ける場合，噴霧が準定常的運動に遷移する時期が見かけ上早期化し，結果的に噴霧先端到達距離から算出される無次元分裂長さが短くなると考えられるためである。更に，コアンダ効果による噴霧間干渉効果は，噴孔数や噴孔配置，及びコーン角等に依存性をもつために，多様な噴孔諸元を扱った際，モデル予測精度の悪化につながったと推測される。そのほか，噴霧の一次分裂特性に寄与するニードル及びキャビテーション挙動も，噴孔仕様により変動するため，多噴孔噴霧の分裂長さ予測精度悪化の要因として考えられる。今後は，更なる分裂長さ予測精度の向上のため，噴霧間干渉効果や，インジェクター内部流動特性を表現する特徴量の抽出を試みる。

4. おわりに

噴霧の分裂・発達特性に深く関係する物理量である分裂長さに着目し，多種多様な液体噴霧の分裂長さを統一的に整理可能な指標の構築に取組んだ。その結果，表面

張力と慣性力の比を表すジェット数，気相における粘性応力と慣性力の比を表す気相レイノルズ数，気液の熱交換過程を代表する無次元量を組み合わせた無次元量のべき乗関数モデルとして，液体種，噴孔諸元，雰囲気環境それぞれが異なる噴霧の分裂長さを統一して記述可能なことを明らかにした。今回構築したモデルによる分裂長さ予測精度は，単噴口噴霧を対象とした場合 12.8%（MAPE），多噴孔噴霧を対象とした場合 19.9%（MAPE）であった。今回構築した無次元量を活用した分裂長さ予測モデルを用いることで，将来的に従来燃料や CN 対応燃料等幅広い燃料種においてもその分裂特性を定量的に予測し，高熱効率と ZIE を両立可能な液体噴射システムの迅速な検討／開発が可能となると期待される。

参考文献

（1）倉持ほか：噴霧の分裂・蒸発特性に及ぼす液体種の影響，微粒化シンポジウム講演論文集，Vol.29, B122（2020）

（2）葛ほか：高温高圧雰囲気場における水添加が自着火・燃焼反応に及ぼす影響，内燃機関シンポジウム講演論文集，Vol.28, 20178073（2017）

（3）V. G. Levich et al. : Physicochemical Hydrodynamics, Englewood Cliffs, Prentice-Hall, pp.639-646（1962）

（4）三好ほか：ガソリンサロゲート詳細反応機構の構築，自動車技術会論文集，Vol.48, No.5, pp.1021-1026（2017）

（5）廣安ほか：ディーゼル噴霧の到達距離と噴霧角，自動車技術会論文集，Vol.21, pp.5-11（1980）

（6）和栗ほか：ディーゼル機関燃料噴霧の到達距離に関する研究，日本機械学会論文集，Vol.25, No.156, pp.820-826（1959）

（7）S. Tanno et al. : Investigation of a novel leaner fuel spray formation for reducing soot in diffusive diesel combustion—Homogenizing equivalence ratio distribution in the lift-off region—, SAE technical paper, 2019-01-2273（2019）

（8）J. Shinjo et al. : Surface instability and primary atomization characteristics of straight liquid jet sprays, International Journal of Multiphase Flow, Vol.37, pp.1294-1304（2011）

（9）N. Itoh : The origin and subsequent development in space of Tollmien-Schlichting waves in a boundary layer, Fluid Dynamics Research, Vol.1, No.2, pp.119-130（1986）

（10）S. Moon et al. : Ultrafast X-ray Study of Multi-hole GDI Injector Sprays : Effects of Nozzle Hole Length and Number on Initial Spray Formation, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol.68, pp.68-81（2015）

（11）M. Hawi et al. : Effect of injection pressure and ambient density on spray characteristics of diesel and biodiesel surrogate fuels, Fuel, Vol.254, 115674（2019）

（12）J. Xia et al. : Experimental study on spray and atomization characteristics under subcritical, transcritical and supercritical conditions of marine diesel engine, Energy Conversion and Management, Vol.195, pp.958-971（2019）

（13）H. Li et al. : Investigation of evaporating sprays in a medium speed marine engine, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol.121, 110278（2021）

（14）J. Du et al. : Macroscopic non-reacting spray characterization of gasoline compression ignition fuels in a constant volume chamber, Fuel, Vol.255, 115818（2019）

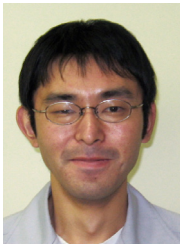
（15）S. Parrish et al. : Evaluation of Liquid and Vapor Penetration of Sprays from a Multi-Hole Gasoline Fuel Injector Operating Under Engine-Like Conditions, SAE Int. J. Engines Vol.7, No.2, 2014-01-1409（2014）

（16）Bronkhorst : FLUIDAT on the Net, https://www.fluidat.com（accessed on 2021）

■著　者■

倉持 晃

原田 雄司


永澤 健

瀬戸 祐利

山下 洋幸

論文・解説

29 微細粒を用いた粒状体ダンパの振動減衰性に関する研究

Study on Damping Performance for Granular Damper Using Fine Particles

阪井　博行 *1　市川　和男 *2*7　小湊　裕允 *3　中野　光一 *4
Hiroyuki Sakai　Kazuo Ichikawa　Hironobu Kominato　Kouichi Nakano
坂木　民司 *5　竹澤　晃弘 *6　北村　充 *7
Minji Sakaki　Akihiro Takezawa　Mitsuru Kitamura

要　約

内燃機関の振動騒音対策には，耐熱性やレイアウトの制約，更には軽量化を考慮して有効となる制振技術を適用することが重要である。本研究では，小型軽量な振動減衰構造として設置の容易性や耐熱性を必要とする箇所での振動減衰を可能とする，粒状体ダンパについて研究開発を行っている。粒状体ダンパは，構造内に複数の粒子を充てんすることで，構造体の振動エネルギーを粒子の摩擦に熱変換して振動減衰する。本減衰構造を自動車部品へと適用するには，粒子間の摩擦力や構造体との衝突力を考慮した設置が重要となる。本稿では，エンジン構造内へ設置可能な振動減衰機構として，基本粒径 100μm 前後の微細粒子を用いた粒状体ダンパの振動減衰の概要について紹介する。

Abstract

For vibration damping devices against the vibrations and noises of internal combustion engines, heat resistance, layout restrictions, and lightweight should be taken into consideration. In this research, we focused on Granular damper that is easy to install due to the compact and lightweight damping structure, to which high heat resistant metals are applicable. To damp vibrations, the granular damper encloses particles in the structure and dissipates the kinetic energy of the structure by frictions between the particles. In order to apply this damping devices to automobile parts, it is necessary to install it in consideration of the frictional force between particles and the collision force with the structure. This paper introduces the outline of vibration damping of a granular damper using fine particles with a basic diameter of some 100μm as a vibration damping mechanism that can be installed in the engine.

Key words : Heat engine, Engine component or element, Vibration/noise, Granular damper, Fine particles, Frictional force, Internal force, Discrete element metod

1. はじめに

2050 年のカーボンニュートラル社会実現に向けて，内燃機関の熱効率改善技術は，CO_2 総排出量を抑制する上でますます重要となっている。熱効率は，燃料がもっている熱エネルギー（低位発熱量）を燃焼によって生じる圧力エネルギーへと変換し，運動エネルギーとして取り出すときの効率となるため，高効率なほど低燃費かつ炭素排出量をおさえることが可能となる。熱効率向上には，エンジン内で発生する燃焼をより急速に行うことが重要となる。しかしながら急速な燃焼によって生じる圧力エネルギーは，より大きな衝撃力となってエンジンの振動騒音をひき起す要因となりうる(1)。したがって，高効率化に伴って大きくなっていく燃焼振動に対して機械振動を低減することは，熱効率の改善につながる技術のひとつともいえる。

本研究では，高効率な燃焼技術と優れた静粛性を更に高めるための制振技術のひとつとして，摩擦や粘性によ

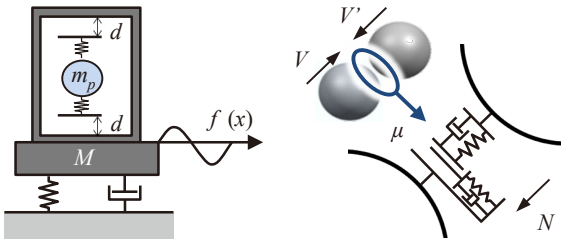
*1〜5　技術研究所
Technical Reserch Center
*6　早稲田大学　理工学術院　基幹理工学部
Waseda University
*7　広島大学大学院　先進理工系科学研究科
Hiroshima University

る抵抗力によって振動エネルギーを低減する，振動減衰に着目して研究開発をしている。これまでに，構造間の摩擦振動によって生じるせん断作用を応用した摩擦減衰の数理モデル化及び自動車部品への設計適用手法を構築してきた[(2)(3)]。本稿ではこれら技術を応用して，高温かつ高荷重な環境でも対応可能な制振手段となりうる“粒状体ダンパ”に着目し，その適用効果と制振メカニズムについての開発事例について報告する。

2. 粒状体ダンパの動作原理と評価手法の構築

2.1　粒状体ダンパの構成と動作原理

粒状体ダンパは，制振対象に空隙を含む空間を形成して内部に多数の粒子を充てんすることで制振を行う，振動減衰要素の一種である（Fig. 1）。充てんする粒子は，金属あるいは無機系材料を用いることが多く，一般的に熱時強度をもつ材料となるため，エンジンなどの構造物への適用も期待できる[(4)]。構造のシンプルさや広帯域での振動減衰効果を得られる利点がある一方で，可動粒子を封入するためその振動特性を予測することが難しい一面もある[(5)]。振動減衰する原理は大別して 2 種類あり，ひとつは自由運動を行う粒子が容器壁面へと衝突することで生じる反力を利用した制振作用（a）と，粒子同士の振動によって生じる摩擦エネルギーを熱へと変換する制振作用（b）である。（a）では制振対象に総質量 m_p に相当する粒子を容器との隙間 d の間隔で封入したとき，振動入力 $f(x)$ に対して粒子と制振対象との間に生じる位相遅れによって反力を生じさせることで振動変位を抑える。これを粒子ごとに微視的に示すと（b）のようになる。個々の粒子は，速度 V，V' で粒子同士が衝突する際の摩擦力（μN）によって振動を熱へと変換して減衰をしている。以上の作動原理を踏まえ，部品スケールでの振動に対してミクロな粒子間摩擦も考慮して性能予測に反映できる，モデルの構築を行った。



(a) Internal forces of impact　　(b) Internal forces of frictional

Fig. 1　Schematic Diagram of Granular Damper

2.2　評価装置・実験条件

振動減衰性能のモデル化には，可動する粒子の挙動についてシミュレーションを行い，上述したふたつの制振作用それぞれを算出して振動応答を定式化することが必要となる。モデル化に先だち，充てんする粒子の特性や充てん量など各因子に対する制振効果を定量的に検証可能な評価装置を構築した。

Fig. 2 は，評価装置の構成と，振動減衰性能の算出方法について図示している。装置は，加振器，計測対象となる試験片の加速度と荷重とを計測するインピーダンスヘッドと，試験片を支持するコンタクトチップから構成される（使用装置：Brüel & Kjær 製，PULSE 8400）。上記の装置構成は，一般的な減衰評価装置と同等となるが，粒状体ダンパでは，加振する振幅量もモデル化に重要な因子となる。そのため，試験片の振れ量を計測可能なレーザー変位計を設置して試験片端部の振幅量も同時計測する装置構成とした。

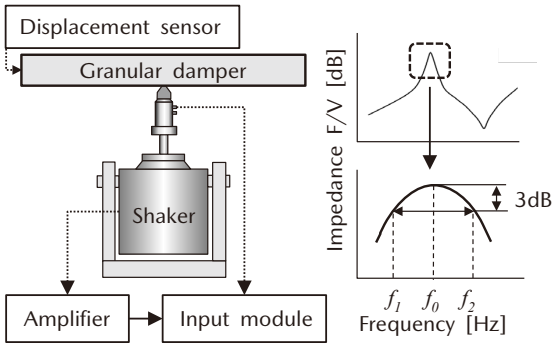


Fig. 2　Experimental Equipment Outline and Damping Factor Calculation

振動の減衰性能は，対象物を振動励起した際の荷重の周波数特性から，反共振周波数での応答を基に算出を行う[(6)]。振動の減衰性能を表す損失係数 η は，反共振時のピーク周波数 f_0 から 3dB 減じたときの両端の周波数差 f_2-f_1 を用いて式(1)のように表すことができる。

$$\eta = \frac{f_2 - f_1}{f_0} \tag{1}$$

つぎに，振動減衰評価に用いた試験片外形と，粒子の充てん方法を Fig. 3 に示す。試験片は，AC4D 製の短冊形状をした試験片で内部に粒子を充てんするための容器を設け，上蓋とボルト締結にて密閉する構造となる。

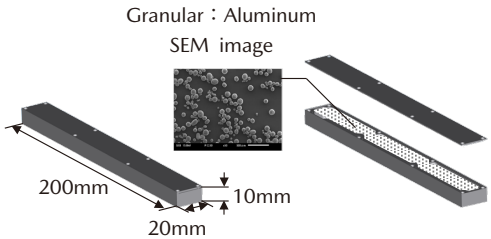


Fig. 3　Schematic Diagram of Granular Damper

粒子充てん時の隙間量を表す空隙率 ε は，構造内部の空間体積を V_T，粒子封入後の隙間体積を v' としたとき，両者の比として式(2)にて表すことができ，充てん粒子

の総質量 m_p と密度 ρ_p から算出することができる。

$$\varepsilon = \frac{v'}{V_T} = 1 - \frac{m_p}{V_T \cdot \rho_p} \quad (2)$$

試験には，耐熱性及びエンジン部品への充てんを考慮して質量増加を最小化しうるアルミニウム粒子を用いた。粒子は，基本粒径 31.79μm，71.78μm の 2 種類をガスアトマイズ法によって製作したものを用いた。

2.3　評価結果・考察

Fig. 4 は，試験片をランダム加振したときの応答荷重 F について，応答速度 V の比で周波数分析した結果となる。グラフは，横軸周波数に対する機械インピーダンス（F/V）を表し，荷重入力に対する構造体の応答特性を示している。図中の実線は，アルミニウム粒子（基本粒径：71.78μm）充てん時の結果となり，破線は容器内に粒子を充てんせず，単体にて加振した結果となる。アルミニウム粒子の充てん量は，容器空間におけるおよそ半分を空隙が占める分量（空隙率 45.6%）を充てんし，振幅量 1.38μm，7.82μm の 2 水準で加振した。

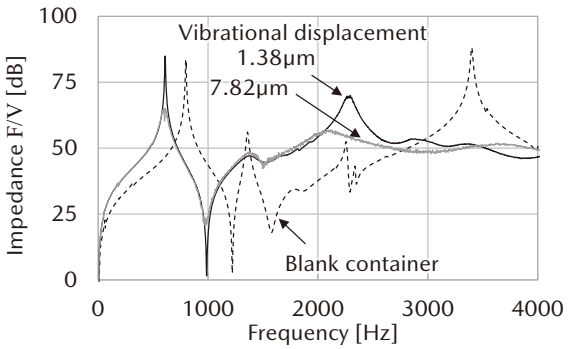


Fig. 4　Frequency Response of the Granular Damper

粒子充てんのない単体加振時の荷重応答特性は，周波数 800，1366，2276，3400Hz にて反共振点をもち，振幅量を変えてもピーク周波数や荷重に変化なく一定の値を示すことを確認している。この結果は，一般的なアルミニウム平板と同様の傾向であり，本試験で用いた試験片は，振幅量に依存した特異な特性変化がほぼない。一方で，粒子を充てんした際の荷重応答特性は，振幅量の増加に伴って荷重応答が小さくなることから，より振動の減衰効果が顕著に現れる。

上記結果の詳細分析をするため，試験片容器単体並びに粒子充てん状態での振幅量と，損失係数の変化をプロットした結果を Fig. 5 に示す。グラフは横軸を振幅量，縦軸を損失係数として，1 次並びに 3 次反共振点での損失係数をプロットしている。損失係数は，容器単体では振幅量，次数によらず一定値を示すが，粒子を充てんすることで振幅量と次数に依存しておおむね増加傾向を示す。

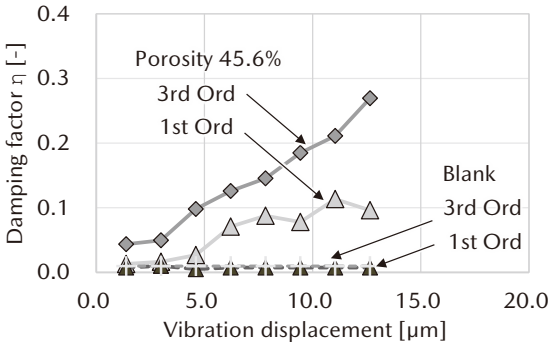


Fig. 5　Damping Factor for Vibration Displacement with and without Particles

損失係数が振幅量に依存する要因は，容器内部に充てんした粒子の運動量増加に伴って衝撃力の増加が寄与したものと推測する。同様に，共振次数が高次になるほど容器のモード変形量が増えることで充てん粒子の摩擦力も増加しているものと推測している。上記現象の詳細は，粒子と試験片との衝突反力の増加が減衰性能に影響しているため，3 章の予測モデルを用いて詳細分析を行う。

つぎに，充てんするアルミニウム粒子の基本粒径を 71.78μm から 31.79μm へと小粒径化したときの周波数応答を Fig. 6 に示す。グラフは，実線が基本粒径 71.78μm の粒子を封入したもので，破線が粒径 31.79μm の粒子を充てんしたときの結果となる。このときの評価条件は，粒子充てん量 22.8g（空隙率 65.1%），振幅量 6.2μm に統一して比較を行っている。それぞれの周波数応答は，比較的類似した傾向を示すが，1 次反共振周波数（1〜1.2kHz）において，小さい粒径 31.79μm のほうがわずかに低い周波数に反共振点をもつ。これは，充てんする粒子質量が同一であっても小さい粒径サイズのほうが，容器内壁と粒子との接触面積が多くなり，見かけの質量が増加したものと推測する。結果，容器内にて可動できる粒子質量が減少することで，減衰性能にも差異が生じてくる。したがって，振動による衝撃反力を効率よく得るためには，自由運動する粒子質量を最大限確保することが減衰性能向上に重要となることを示唆している。

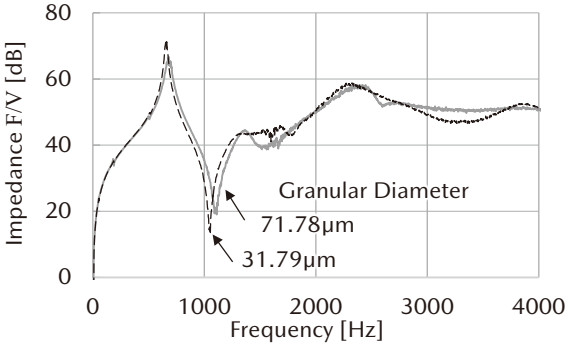


Fig. 6　Frequency Response of Granular Damper for Each Particle Size

また，それぞれの粒子径，空隙率，振幅ごとの損失係数をまとめた結果を Fig. 7，8 に示す。Fig. 7 は，基本粒径 31.79μm，Fig. 8 は 71.78μm における比較結果となり，3 次の反共振点での損失係数を比較している。損失係数はいずれの粒子径においても，大きな振幅量となるほど高い減衰性能を示す傾向となり，空隙率に対して極大となる充てん量が存在する。粒径 31.79μm の粒子充てん時には，比較的高充てんな 40%前後，粒径 71.78μm のときは 75%にて極大値をもつ。

上記の結果は，基本粒径のサイズ差によって摩擦力に差異が生じることで，極値も変化するものと推測している。そのためより効率的に減衰効果を得るには，制振対象となる部品の大きさに適合した，粒径と空隙率を選定する必要がある。

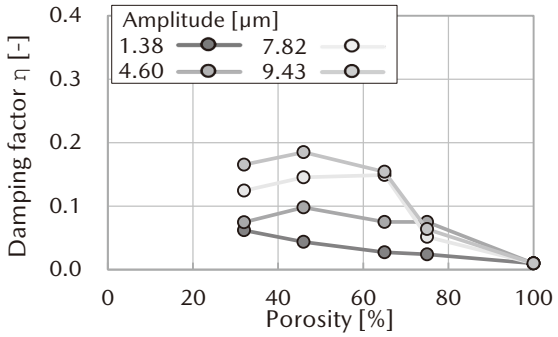


Fig. 7　Comparison of Damping Factor for Amplitude Change at the Third-order Anti-resonance Point in Aluminum with a Particle Size of 31.79μm

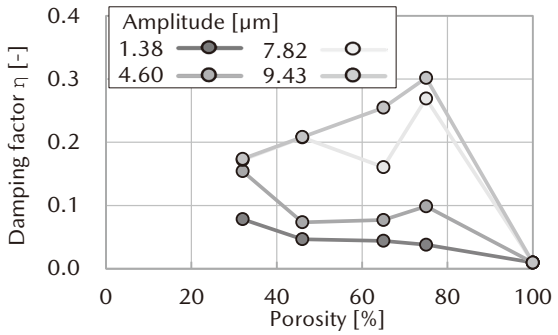


Fig. 8　Comparison of Damping Factor for Amplitude Change at the Third-order Anti-resonance Point in Aluminum with a Particle Size of 71.78μm

3. 粒状体ダンパの減衰性能予測手法の構築

粒状体ダンパの振動減衰性能は，一般的な金属材料と比較して高い減衰効果を発現する一方で，充てんする粒子の仕様や振幅量，振動次数によって効果に差が生じることが実験から導出された。本章では，充てんする粒子の特性変化に対する減衰性能の予測手法と内部挙動変化について述べる。

本研究では，粒状体ダンパの加振状態を模擬するため，加振点とばねで接合した容器の中に任意の粒状体を充てんして減衰性能予測を可能にする，粒状体ダンパモデルを構築した（Fig. 9）。このモデルは，計算コストの制約を考慮し，容器は一辺 1mm の立方体構造に縮約している。また，充填した粒子との衝突力を反映するため，容器と同等の機械特性をもつ粒子を外壁部に配置している。減衰性能の予測は，容器の振動解析から行っている。

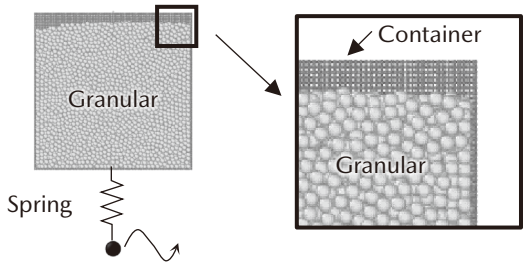


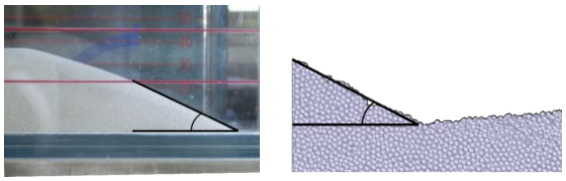
Fig. 9　Granular Damper Calculation Model

粒子の挙動計算には，解析対象内を自由運動する要素のモデル化並びに要素間の接触や摩擦を考慮して逐次計算可能な，離散要素法（Discrete Element Method，以下 DEM）を用いた[7]。DEM の計算ソフトは，分子動力学法の計算で使われるサンディア国立研究所の LAMMPS（Large-scale Atomic Molecular Massively Parallel Simulator）を用いている。計算には，DEM 用ソルバーである Granular models を使用することで，Hertz の接触理論をベースに材料の機械的特性を考慮した。

3.1　計算パラメータの同定

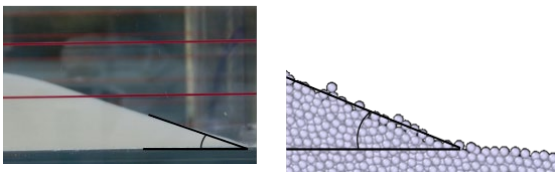
Granular models を用いて実態に則した粒子の挙動計算を行うには，比重や剛性などの機械特性にくわえて，粒子表面の摩擦係数を定義する必要がある。粒子の摩擦係数は，形状に起因して変化するため安息角を実測して同等となる摩擦係数をモデルに反映した。安息角は，一定の高さから粒子を落下させて自発的に崩れることなく安定的に形成する山の斜面と，水平面とのなす角度を表し，粒状体の流れやすさの指標化に用いられる。安息角が大きい粒子は，高い摩擦係数となって振動入力に対し可動している時間が短くなる。粒状体ダンパの性能予測には重要な制御因子となるため，試験と同様の安息角となる静止摩擦係数をシミュレーションより求めて数値化した。

Fig. 10 は，粒径 71.78μm のアルミニウム粒子の安息角を，Fig. 11 は粒径 125μm のジルコニア粒子の安息角を比較した結果となる。それぞれ，（a）実験及び（b）DEM 計算による比較結果となり，測定結果も併記している。比較に用いた粒子種において実験と計算値との誤差は 1%以内となることから，安息角を精度よく再現できており，同定した静止摩擦係数は実測に近い値を得ることができたと考えられる。



(a) Experimental: 26.67°　(b) Simulation: 25.37°

Fig. 10　Comparison of Repose Angle Experiment and Simulation (71.78μm Aluminum Powder)



(a) Experimental: 22.00°　(b) Simulation: 23.62°

Fig. 11　Comparison of Repose Angle Experiment and Simulation (125μm Zirconia Powder)

同様の比較方法を用いて実験，解析で求めた安息角の相関結果を Fig. 12 に示す。一般的に，粒子径が小さくなるほど流動性が低下して静止摩擦係数も高くなるが本モデルでは静止摩擦係数 0.25～0.40 にて高い予測精度を得ることができた。Table 1 に本研究で用いた粒子の物性値，安息角及び静止摩擦係数について示す。

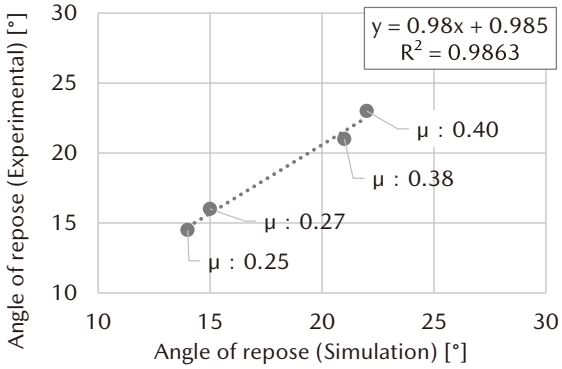


Fig. 12　Comparison of Angle of Repose Simulation and Experiment (The Value in the Graph is the Static Friction Coefficient.)

Table 1　Physical Property Value of Granular Material

Parameters	Unit	Value	
Granular	[-]	Aluminum	Zirconia
Diameter	[μm]	71.78	125
Density	[g/cm^3]	2.7	6.0
Young's modules	[GPa]	68.3	200
Poisson's ratio	[-]	0.34	0.31
Coefficient of restitution	[-]	0.5	0.8
Angle of repose	[°]	26.67	22.00
Static friction coefficient	[-]	0.50	0.40

3.2　減衰性能予測結果及び考察

構築したモデルを用いて減衰性能予測を行い，計測結果との予実差について比較を行った。モデル検証には，実験方法を準拠して容器下部から垂直方向の振動をランダム波によって与え，荷重の周波数特性から損失係数を算出した。また，対象物の固有振動数は試験で得られた反共振周波数と同一となるようにばね定数を調整することで可動粒子の挙動を実測と揃えた比較計算を行っている。なお，予実差の検証は，粒径 71.78μm アルミニウム粒子と粒径 125μm ジルコニア粒子にて比較を行った。これは，基本粒径 31.79μm での性能予測は，高周波での計算実行に膨大な計算リソースを要することから上記 2 種の比較とした。Fig. 13 に，強制加振時の粒子挙動に関する計算実施例を示す。図は，粒子に作用する力の大きさをカラーマップで示し，矢印が粒子に作用する速度ベクトルを示している。容器内部粒子は，不規則に動きながら構造体並びに粒子同士の衝撃力を受けて運動を行っている。

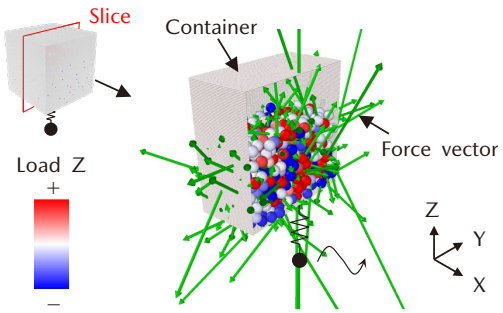


Fig. 13　Granular Damper of Simulation

Fig. 14 は，基本粒径 71.78μm のアルミニウム粒子を用いた粒状体ダンパモデルの計算値並びに中央加振での実測値について，損失係数を比較した結果となる。グラフ横軸は，空隙率 ε [%]，縦軸は損失係数 η [-] を示し，粒子の充てん量増加に伴って減衰性能が向上した傾向を示す。モデルでの予測結果は，実測値と比較して 15%以内の予測精度となり，縮小されたモデルでも一定の精度をもっている。

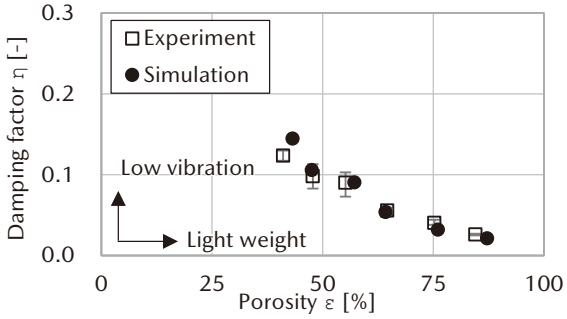


Fig. 14　Damping Factor for Porosity (71.78 μm Aluminum Powder)

同様に，粒径 125μm のジルコニア粒子での比較結果を Fig. 15 に示す。両者を比較すると，空隙率 70～80% の範囲にて精度が十分でなく，極大となる空隙率も差異が生じている。

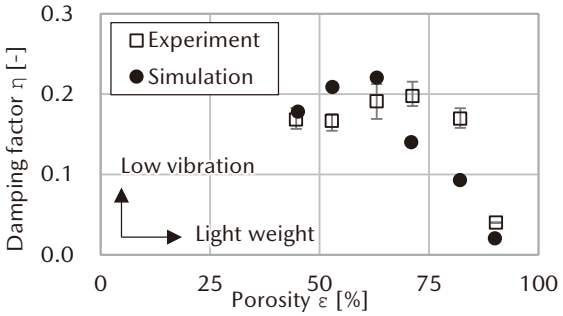


Fig. 15　Damping Factor for Porosity (125μm Zirconia Powder)

これは，アルミニウムと比較して高比重なジルコニア粒子において予実差が大きくなることと，より空隙率の高い範囲にて誤差を生じていることから，粒子と容器との衝突によって生じる反力を過少に見積もっていると推測する。Fig. 16 は，それぞれの条件において粒子が受け取るエネルギー量の内訳を摩擦力と衝撃力で分類して表示したものとなる。比重の大きいジルコニア粒子（破線）は，空隙率 70%以上の範囲にて衝撃エネルギーが顕著に増大しているが，このエネルギーが十分に損失係数へと影響しきれていない。結果，測定結果との差異を生じているため，高比重粒子での予測には実験との整合を取りつつ解析を活用する必要がある。より高精度なモデルへと改善するには，実働時の粒子反力計測のほか試験容器と同等形状でのモデル構築が必要であり，継続してモデルの精度改善を図る。

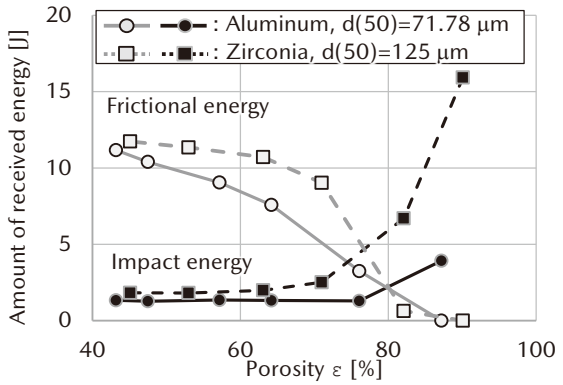


Fig. 16　Received Energy of Granular for Porosity

4. おわりに

本研究では，基本粒径 100μm 程度の微細粒を容器充てんして振動減衰する，粒状体ダンパの基本原理と制振原理について検討を行った。検討には，梁の減衰試験で用いられる試験法に準拠して，粒子の径と充填量，粒子種を変化させ差異を分析するとともに計算コストも考慮した予測モデルの構築を行った。以上の取り組みを通じて次の知見を得た。

（1）微細粒による粒状体ダンパの振動減衰は，振動変位と共振次数に対する寄与が大きく，大変位かつ高次数であるほど高い振動減衰を示す。

（2）充てんする粒子は，粒子径や粒子種，振幅量によって最大となる充填量に変化が生じる。部品適用には制振対象に応じた仕様を選定する必要がある。

（3）振動減衰性能予測には，縮約された容器（1mm^3）を用いたDEMシミュレーションを用いることで，エネルギー収支も含めたCAE予測を可能とする。本モデルは，より優れた粒状体ダンパの設計に役立てることができる。

本技術がクルマの静粛性向上及び高効率な内燃機関の更なる効率改善に貢献できるよう，今後も研究を行っていく。

本研究成果は，科学技術振興機構研究成果最適展開支援プログラム（A-STEP）シーズ育成タイプの委託研究により得られた成果です。

参考文献

（1）白橋ほか：SKYACTIV-D ディーゼルノック音の低減技術，マツダ技報，No.34, pp.29-34（2017）

（2）大瀬戸ほか：摩擦を利用した振動低減法に関する研究，Dynamics & Design Conference2018, 320, DOI:10.1299/jsmedmc.2018.320

（3）K. Ichikawa et al. : Structural topology and lattice optimization of gasoline engine piston considering strength, The 13th World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization,（2019）

（4）市川ほか：微細粒を用いた粒状体ダンパの振動減衰性に関する研究，日本機械学会論文集，Vol.87, No. 896（2021）, DOI:10.1299/transjsme.20-00389.

（5）古賀ほか：高い固有振動数を有する構造物における粒状体ダンパの減衰メカニズム，日本機械学会論文集，Vol.83, No.855（2017）, DOI:10.1299/transjsme.17-00220.

（6）JIS K 7391，非拘束形制振複合はりの振動減衰特性試験方法，日本規格協会（2008）

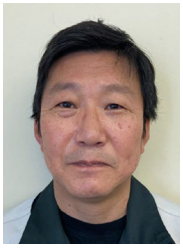
（7）Cundall et al. : O. D. A., A discrete numerical model for granular assemblies, Geotechnique, Vol.19, No.1, pp.47-65（1979）

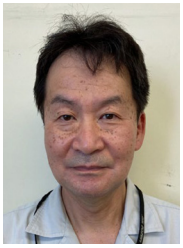
■著　者■

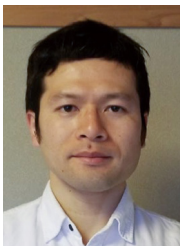
阪井 博行

市川 和男

小湊 裕允


中野 光一


坂木 民司


竹澤 晃弘

北村 充

社外への発表論文一覧表（2020 年 1 月～12 月）

1．社外講演（海外）　　＊所属は原則発表時点を示す

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2020.1.24-29	38th International Symposium on Combustion	Effect of low-temperature chemistry on the wall heat flux in HCCI combustion	Y. Minamoto Y. Kondo K. Osawa Y. Harada M. Shimura M. Tanahashi	Tokyo institute of technology 同上 同上 Mazda Motor Corporation Tokyo institute of technology 同上
2020.2.23-27	TMS 2020 149th Annual Meeting & Exhibition	Comparison of Fracture Morphologies and Hydrogen States Present in Vicinity of Fracture Surface Obtained by Different Methods of Evaluating Hydrogen Embrittlement of DP and TRIP Steels	浅里　大地 高井　健一 溝上　達志 深堀　　貢	上智大学 同上 技術研究所 同上
2020.3.5-6	International Conference on Industrial Applications of Adhesives 2020	High damping weld bonds adhesive for automotive applications	Steve Hwe 西田　貴富 八巻　　悟 氷室　雄也	Sunstar Engineering Americas サンスター技研（株） 車体技術部 技術研究所
2020.4.2-5	Advances in Alzheimer's and Parkinson's Therapies（AAT-AD/PD2020）	A Study and Evaluation Using Voice to Gauge the Driving Ability of the Elderly	M. Higuchi M. Nakamura T. Takano T. Okazaki J. Takemura Y. Omiya S. Shinohara S. Mitsuyoshi S. Tokuno	東京大学 同上 同上 統合制御システム開発本部 同上 PST（株） 東京大学 同上 同上
2020.4.21-23	WCX 2020 SAE World Congress Experience	Droplet Behaviors of DI Gasoline Wall Impinging Spray by Spray Slicer	駱　　洪亮 王　　超 西田　恵哉 尾形　陽一 隆　　武強 張　　武 原　　亮介 藤川　竜也	広島大学 大連理工大学 広島大学 同上 大連理工大学 パワートレイン技術開発部 同上 同上
2020.5.31-8.31	ICRA 2020- Internatinal Conference on Robotics and Automation	Muscle and Brain Activations in Cylindrical Rotary Controller Manipulation with Index Finger and Thumb	岡谷　梨央 積際　　徹 横川　隆一 成末　充宏 西村　啓人 武田　雄策 原　　利宏	同志社大学 同上 同上 技術研究所 同上 同上 同上
2020.7.16-20	Applied Human Factors & Ergonomics, the 11th International Conference on Applied Human Factors & Ergonomics（AHFE2020）	Towards a Truly Cooperative Guidance and Control: Generic Architecture for Intuitive Human-Machine Cooperation	Marcel Usai Ronald Meyer H. Nagahara Y. Takeda Frank Flemisch	IAW of RWTH Aachen University 同上 技術研究所 同上 IAW of RWTH Aachen University, and Fraunhofer Institute for Communication, Information, Processing and Ergonomics（FKIE）
2020.8.16-19	The American Society of Mechanical Engineers（ASME）International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference 2020（IDETC/CIE2020）	Design Space Analysis Method for Support of System Design under the Consideration of Uncertainties in the Early Designstage	青山　和浩 内堀　嘉洋 大泉　和也 平松　繁喜 宇根﨑　弘 近藤　秀一	東京大学 同上 同上 統合制御システム開発本部 同上 電子基盤開発部

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2020.8.24-26	Institute of Electrical and Electronics Engineers（IEEE） The 4th IEEE Conference on Control Technology and Applications（CCTA 2020）	Active Damping of Drivetrain Vibrations with Compensation for Time-Varying Long Control Cycle Due to Actuator Constraint	米沢　平成 梶原　逸朗 西留　千晶 波多野　崇 坂田　将人 平松　繁喜	北海道大学 同上 キャテック（株） 統合制御システム開発本部 企画設計部 統合制御システム開発本部
2020.9.9-11	International Research Council on Biomechanics of Injury（IRCOBI） IRCOBI 2020 Conference	Identification of influential factors for seatbelt kinematics in a collision and analysis of their influence degree to the kinematics	泉山　朋大 西田　周泰 岩永　秀幸 陳　　献 大木　順司 朝日　龍介 杉本　　繁 福島　正信	衝突性能開発部 山口大学 同上 同上 同上 衝突性能開発部 同上 同上
2020.9.23-26	The SICE Annual Conference 2020	Research Report on Estimation Charging Efficiency using Soft Sensors as Advanced Control	小川　史恵 松江　浩太 目良　　貢 清水　　良 和田　正義	技術研究所 パワートレイン開発本部 技術研究所 パワートレイン開発本部 東京農工大学
		Modeling and Prediction of Pedestrians' and Cyclists' Road Crossing Behavior using Near-Miss Incident Data	高地　鳳真 齊藤　裕一 伊藤　　誠 伏間　丈悟 菅野　　崇 山本　泰典	筑波大学 同上 同上 技術研究所 同上 同上
2020.9.26-10.2	the 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium	Human Body Recognition Method Using Diffraction Signal in NLOS Scenario for Millimeter wave Radar	Jianghaomiao He 木寺　正平 寺島　将太 山田　秀行	電気通信大学 同上 技術研究所 同上
2020.10.11-14	IEEE SMC 2020	Spatial Perception and Operational Behavior in an Obstacle Approach	河合真太郎 廣川　暢一 上杉　直久 古郡　　了 原　　利宏 鈴木　健嗣	筑波大学 同上 技術研究所 同上 同上 筑波大学
2020.10.13-16	Pacific Center of Thermal Fluids Engineering（PCTFE）， The 31th International symposium on transport phenomena（ISTP31）	Effect of the curvature radius for 90-degree curved circular nozzle on internal flow and oil jet behavior	川口　幹祐 三村　渓太 西田　恵哉 幸徳　正信 山本　　亮 中島　　聖 尾形　陽一	広島大学 同上 同上 MBD 革新部 同上 同上 広島大学
		Study of breakup on water film sheared by steady and pulsatile air flow in a horizontal rectangular duct	中田昇太郎 秋山　京介 馬　　季 西田　恵哉 山本　　亮 中島　　聖 中村　和博 丸井堅太郎 西村　真人 横畑　英明 尾形　陽一	広島大学 同上 同上 同上 MBD 革新部 同上 同上 同上 同上 同上 広島大学
		Study of air-water interface behavior in straight and curved rectangular ducts	尾形　陽一 中田昇太郎 秋山　京介 馬　　季 呉　　清 西田　恵哉 山本　　亮 中島　　聖 中村　和博 丸井堅太郎 西村　真人 横畑　英明	広島大学 同上 同上 同上 同上 同上 MBD 革新部 同上 同上 同上 同上 同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2020.10.13-16	Pacific Center of Thermal Fluids Engineering（PCTFE）, The 31th International symposium on transport phenomena（ISTP31）	Numerical and experimental studies of heat transfer for straight and 90 degree curved duct	尾形　陽一 神垣　雅也 GUO GUANNING 井上　佑哉 西田　恵哉 山本　　亮 幸徳　正信 横畑　英明 本郷　　均	広島大学 同上 同上 同上 同上 MBD 革新部 同上 同上 同上
2020.11.17	3DEXPERIENCE® Modeling & simulation virtual conference 2020	Mazda Development Process Innovation utilizing SFE Concept	木崎　　勇 松岡　智恵	衝突性能開発部 ボデー開発部
2020.11.22-26	The Korean Society of Mechanical Engineers（KSME） Asian Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization 2020（ACSMO 2020）	Robust Design Using Interval Design Variables for MDO	宇根﨑　弘 荒川　雅生 平松　繁喜 近藤　秀一 佛圓　哲朗	統合制御システム開発本部 香川大学 統合制御システム開発本部 電子基盤開発部 香川大学
2020.11.25	Asian Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization	Research on cross-sectional shape of lightweight and highly functional car body flame by bidirectional engineering and mathematics approach	本田　正徳	技術研究所

2．社外講演（国内）　　＊所属は原則発表時点を示す

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2019.12.7	東京理科大学 研究推進機構総合研究院 脳学際研究部門 第 3 回公開シンポジウム	fMRI による自動車操舵時の脳活動研究	岡本　宜久	技術研究所
2019.12.10-12	自動車技術会・日本機械学会 第 30 回内燃機関シンポジウム	分子動力学法を用いたエンジン摺動面の境界潤滑計算手法	河口健太郎 宮内　勇馬 小林　　森 泉　　聡志	技術研究所 同上 東京大学 同上
2020.1.10-12	日本放射光学会 第 33 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム	光電子分光その場分析による Rh ナノ粒子の酸化挙動の解明	中西　美恵 國府田由紀 兒玉　　潤 住田　弘祐 上田　昇平 近藤　　寛 鈴木　　哲	技術研究所 同上 同上 同上 慶応大理工 同上 兵庫県立大高度産業科学技術研究所
2020.1.14	（株）広島テクノプラザ 品質管理に役立つ材料分析	品質管理に役立つ材料分析	三根生　晋 橋本　陽介 山田　洋史	技術研究所 品質本部 R&D 技術管理本部
2020.1.15-17	RX Japan（株） 第 10 回 クルマの軽量化技術展 軽量化革新フォーラム	自動車における構造接着技術の動向と課題	山本　研一 氷室　雄也 中川　興也 麻川　元康	技術研究所 同上 同上 同上
2020.1.15-17	RX Japan（株） 第 12 回オートモーティブワールド 2020	マツダの目指す MBD と車両電装システム開発での適用事例	浜田　　康	電子性能開発部
2020.1.17	自動車技術会 シンポジウム「未来のモビリティ社会に貢献するバーチャル開発」	CAE 技術を用いた MAZDA3 の車体開発	川本　篤史	衝突性能開発部
2020.1.21	自動車技術会 パワートレイン開発における計測・CFD 技術の最前線	マイクロ PIV による壁面熱伝達現象の解明およびモデル構築	原田　雄司	技術研究所
2020.1.24	（株）JSOL 第 7 回 樹脂・複合材 解析セミナー	CFRP UD 積層部材の 4 点曲げ解析の検討	西原　剛史 河村　　力 金本　俊介	衝突性能開発部 技術研究所 MBD 革新部
2020.1.29	HEPT コンソーシアム 第 7 回 HEPT フォーラム	マツダが目指す先進安全とコネクティビティの未来像	後藤　誠二	統合制御システム開発本部
2020.1.29-31	省エネルギーセンター ENEX2020　第 44 回地球環境とエネルギーの調和展	熱流れの計測解析技術の開発／電気駆動車の計測実施／自動車の熱流れモデルの構築	山賀　勇真	技術研究所
		モデルベースによる自動車の熱マネージメント技術開発	山賀　勇真	技術研究所
2020.1.29	第 1 回「富岳」高性能シミュレーション技術交流会	自動車空力の多目的最適化とサロゲートモデル構築に向けて	平岡　武宜 犬井　太一	技術研究所 神戸大学
2020.2.12	（株）技術情報協会 技術セミナー	世界で最も環境負担の少ない新水性塗装技術「アクアテック塗装」について	常岡　辰夫	車両技術部
2020.2.13	日本陸用内燃機関協会 講演会	次世代ガソリンエンジン SKYACTIV-X の開発 ～マツダのクルマづくりと内燃機関の効率向上への挑戦～	高松　宏志	エンジン性能開発部
2020.2.14	RX Japan（株） 第 4 回スマート工場 EXPO	製造現場における検査工程のスマート化 ～ IVI 実証実験（Deep Learning, AI 適用）より～	市本　秀則	生産企画部
2020.2.14	自動車技術 2020 年 自動車技術会新開発 エンジンシンポジウム	米国向け SKYACTIV-D2.2 の開発	山口　能将	走行・環境性能開発部
		新型 2.0L ガソリンエンジン SKYACTIV-X の紹介	末岡　賢也	エンジン性能開発部

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2020.2.14	自動車技術 2020 年 自動車技術会新開発 エンジンシンポジウム	SKYACTIV-X の SPCCI 燃焼を実現する技術	井上　淳	エンジン性能開発部
2020.2.18	産業技術総合研究所 構造材料シンポジウム	自動車のマルチマテリアル化と異材接合技術	杉本　幸弘	技術研究所
2020.2.18	（株）JSOL 塑性加工セミナー in 広島	超高張力鋼板の精度初期品質向上への取り組み	酒井　明	車体技術部
		JSTAMP における外板部品の予測精度検証	森澤　誠	車体技術部
2020.2.28	広島デジタルイノベーションセンター 第 6 回 MBD エンジニアフォーラム	マツダの目指す MBD と車両電装システム開発での適用事例	浜田　康	電子性能開発部
2020.3.12-13	インダストリアル・バリューチェーン・イニシアティブ IVI 公開シンポジウム 2020 -Spring-	グループワーキング報告 人・モノの実績可視化／分析と最適化ー II（次世代 IE の追究）	吉岡　新 島田　洋	生産企画部 同上
		グループワーキング報告 素材製造ラインにおける品質向上シリンダーヘッド（鋳造）編」	堀井　信克 橋本　修一	パワートレイン技術部 同上
		グループワーキング報告 「5G を睨んだ AGV システムの開発」	奥屋　太志 藤岡　義弘	車両技術部 同上
2020.3.27	産業技術総合研究所 第 6 回トリリオンセンサ・可視化研究会講演会	自動車における構造接着材料の動向と課題	山本　研一 麻川　元康 氷室　雄也 中川　興也	技術研究所 同上 同上 同上
2020.5.20-22	システム制御情報学会 第 64 回システム制御情報学会 研究発表講演会	投影型複合現実感技術を用いた自動車ピラートリム意匠設計支援	義田遼太朗 岩井　大輔 佐藤　宏介 村瀬　健二 原　利宏 武田　雄策	大阪大学 同上 同上 技術研究所 同上 同上
2020.5.25-27	日本生体医工学会 第 59 回 日本生体医工学会大会	音声バイオマーカー応用：自動車の運転能力と音声の関係	岡﨑　俊実	統合制御システム開発本部
2020.5.27-30	日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2020	認知・操作行動指標に基づく運転技量評価のための VR シミュレータの開発	河合真太郎 廣川　暢一 上杉　直久 古郡　了 原　利宏 鈴木　健嗣	筑波大学 同上 技術研究所 同上 同上 筑波大学
2020.6.14	広島市立大学・広島修道大学 二大学連携講義 プロジェクトマネジメント論	企業活動とプロジェクトマネジメント	白　雪峰	統合制御システム開発本部
2020.6.19	SCSK（株） pSeven Japan User Conference 2020	サロゲートモデルを用いたエンジニアの潜在的アイデアを可視化する最適設計技術	小平　剛央	技術研究所
2020.7.1	東京工業大学 超スマート社会推進コンソーシアム 2020 年度 SSS マッチングワークショップ ニーズラウンド（第 1 回）	超スマート社会に向けた活動状況やニーズのご紹介	武田　雄策	技術研究所
2020.7.8	イノベーティブ・デザイン LLC システムズエンジニアリング／Model-Based システムズエンジニアリング シンポジウム 2020	高度化，複雑化する自動車のシステムアーキテクチャ開発を推進するシステムズエンジニアへの期待	今田　道宏	統合制御システム開発本部
2020.7.31	自動車技術会 フォーラム「Cars that think and communicate Ⅰ 高度自動運転へ 互いにわかりあえるクルマを目指して」	マツダが目指す自動車の未来像 ―全ての人に「走る歓び」を永遠に提供し続けるクルマ作りと目指す社会―	栃岡　孝宏	商品戦略本部

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2020.8.31	（株）Goldratt Japan TOC クラブ	とあるエンジニアの働き方改革	川本　篤史	衝突性能開発部
2020.9.1-4	日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2020	可変制御周期による影響を考慮した自動車駆動系のアクティブ振動制御	米沢　平成 梶原　逸朗 西留　千晶 波多野　崇 坂田　将人 平松　繁喜	北海道大学 同上 キャテック（株） 統合制御システム開発本部 企画設計部 統合制御システム開発本部
		微細粒を用いた粒状体ダンパの振動減衰性に関する研究	市川　和男 阪井　博行 小湊　祐允 大瀬戸将輔 竹澤　晃弘 北村　　充	技術研究所 同上 同上 広島大学 同上 同上
		離散要素法を用いた微細粒の粒状体ダンパの振動減衰性能予測に関する研究	阪井　博行 市川　和男 小湊　祐允 大瀬戸将輔 竹澤　晃弘 北村　　充	技術研究所 同上 同上 広島大学 同上 同上
2020.9.7	広島市立大学 特別講義 情報科学特論	感性，脳の知識を工学に応用する―ものづくり企業における感性，脳の知識の応用―	道田奈々江	技術研究所
2020.9.9	省エネルギーセンター 令和 2 年度 省エネ大賞 地区発表大会	自動車塗装における CO2 と VOC を同時削減する VOC 回収技術	加藤　　雄	車両技術部
2020.9.9	アンシス・ジャパン（株） Ansys INNOVATION CONFERENCE 2020	自動車制御システムのモデルベース開発	末冨　隆雅	統合制御システム開発本部
2020.9.9-11	RX Japan（株） 名古屋 ものづくり ワールド 2020	共通車台開発を支える 3D-CAD 技術	縄　　淳二	ボデー開発部
2020.9.9-11	日本感性工学会 第 22 回日本感性工学会大会	結合音による自動車車内音のサウンドデザインに関する検討	山際　納月 石光　俊介 油木　　悠 藤川　智士 松本　貢典	広島市立大学 同上 同上 パワートレイン開発本部 エンジン性能開発部
2020.9.9-11	日本 XAFS 研究会 第 23 回 XAFS 討論会	放射光を用いた触媒反応メカニズム解明	國府田由紀	技術研究所
2020.9.13-16	日本機械学会 日本機械学会 2020 年度年次大会	ボルト・ナット締結体のせん断剛性に関する研究	村井　絢香 橋村　真治 渡邉　忠俊	芝浦工業大学 同上 技術研究所
		ボルト・ナット締結体の荷重変位特性に対するワッシャ形状の影響	渡邉　忠俊 橋村　真治 村井　絢香	技術研究所 芝浦工業大学 同上
		CASE の時代におけるモデルベース開発の課題	平松　繁喜	統合制御システム開発本部
		水平方向加振における着座人体の振動特性と振動知覚に関する研究	姚　　毅 玉置　　元 吉村　卓也 北原陽一郎 山下　亘貴	東京都立大学 同上 同上 技術研究所 同上
2020.9.14-10.4	大気環境学会 第 61 回大気環境学会年会	電気自動車の導入と火力発電需要増を考慮した大気環境影響評価	森川多津子 野村　誠治 山本　博之 伊藤　晃佳 冨田　幸佳 早崎　将光	日本自動車研究所 技術研究所 同上 日本自動車研究所 同上 同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2020.9.15-18	電子情報通信学会 2020 年電子情報通信学会ソサイエティ大会	車載レーダ解析に特化した FDTD 法の高速計算手法	奥木　友和	技術研究所
2020.9.16-18	高分子学会 第 69 回高分子討論会	シロキサン骨格を活用した防曇材料の開発	前田　哲爾 濱田　　崇 塚田　　学 桂　　大詞 岡田　健太 大下　浄治	技術研究所 広島大学 千葉大学 技術研究所 広島大学 同上
2020.9.17	ProSTEP prostep ivip Symposium 2020	プラントモデル　インターフェースガイドライン	足立　智彦	統合制御システム開発本部
2020.9.18-20	日本流体力学会 日本流体力学会 年会 2020	曲がり管から放出されるオイルジェットの気液二相流シミュレーション	松下真太郎 青木　尊之 青木　律也 Kai Yang 中島　　聖 山本　　亮 幸徳　正信 横畑　英明	東京工業大学 同上 同上 同上 MBD 革新部 同上 同上 同上
		矩形流路内に溜まった凝縮水のエア流入による排出の気液二相流シミュレーション	青木　律也 青木　尊之 松下真太郎 Kai Yang 中島　　聖 山本　　亮 幸徳　正信 横畑　英明	東京工業大学 同上 同上 同上 MBD 革新部 同上 同上 同上
2020.9.24	マルチフィジックス・連成解析・多目的最適化技術の最新動向	車体構造の複合領域最適化とデータマイニングを用いた設計知見の獲得手法	小平　剛央	技術研究所
2020.9.25	有機デバイス研究会 第 121 回研究会「異種材料接合の科学と技術」	自動車における構造接着技術の動向と課題，マツダの取り組み	山本　研一 麻川　元康 氷室　雄也 中川　興也	技術研究所 同上 ボデー開発部 技術研究所
2020.10.8	RX Japan（株） 第 4 回関西 接着・接合 EXPO	マツダにおける異種材料接合技術の取組み	髙見　明秀	技術研究所
2020.10.9-11	日本ロボット学会 第 38 回日本ロボット学会学術講演会	ステアリング操舵時における上肢姿勢に基づく手先コンプライアンス特性	杉本帆乃香 積際　　徹 横川　隆一 成末　充宏 武田　雄策 原　　利宏	同志社大学 同上 同上 技術研究所 同上 同上
		HMI コマンダ操作時におけるディスプレイ表示応答時間が脳活動へ及ぼす影響	大島健太郎 積際　　徹 横川　隆一 成末　充宏 西村　啓人 武田　雄策 原　　利宏	同志社大学 同上 同上 技術研究所 同上 同上 同上
		コマンダ回転操作における表面筋電位計測に基づく示指・拇指のコンプライアンス特性	林　　真優 積際　　徹 横川　隆一 成末　充宏 武田　雄策 原　　利宏	同志社大学 同上 同上 技術研究所 同上 同上
		つまみ回転操作時における示指・拇指のコンプライアンス特性に基づく指姿勢解析	伊藤　亮平 積際　　徹 横川　隆一 成末　充宏 武田　雄策 原　　利宏	同志社大学 同上 同上 技術研究所 同上 同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2020.10.10-11	日本機械学会 熱工学コンファレンス 2020	着火遅れ測定高精度化のためのセクション間混合層を考慮した衝撃波一次元数値解析	進士　勇太 下栗　大右 寺島　洋史 三好　　明 山田　眞平 八房　智顯 乃生　芳尚 斉藤　史彦	広島大学 同上 北海道大学 広島大学 同上 広島工業大学 技術研究所 同上
		定容容器を用いた自着火を伴う条件での火炎伝播挙動についての調査	西村　凌平 常藤　飛鳥 瀬尾　健彦 三上　真人 下栗　大右 河野　通治	山口大学 同上 同上 同上 広島大学 MBD 革新部
2020.10.16	IEEE 広島支部 IEEE Metro Area Workshop 2020	情報技術の活用に基づく次世代車両システム実現への取り組み	吉岡　　透	統合制御システム開発本部
2020.10.20	自動車技術会 第 12 回自動車制御とモデル研究部門委員会	SKYACTIV-X の制御システム	津村雄一郎	PT 制御システム開発部
2020.10.20-22	日本化学会 第 10 回 CSJ 化学フェスタ 2020	自動車における構造接着技術の動向と課題	山本　研一 麻川　元康 中川　興也 氷室　雄也	技術研究所 同上 同上 ボデー開発部
2020.10.21-23	RX Japan（株） 第 3 回 名古屋 クルマの軽量化 技術展	マツダにおける異種材料接合技術の取組み	髙見　明秀	技術研究所
2020.10.21-23	自動車技術会 2020 年秋季大会学術講演会	被水シミュレーションを用いた車両腐食環境の予測技術	丸山　　慧 土屋　明宏 落岩　克哉 吉田　敏弘 山根　貴和 上岡　孝志 志賀　俊夫	車両実研部 同上 同上 同上 同上 同上 エンジン設計部
		過渡運転に適用可能なガソリン HCCI のモデリング	飯田　晋也 葛　　晰遥 三角　春樹 伊藤　直也 山川　正尚	パワートレイン技術開発部 技術研究所 パワートレイン技術開発部 同上 同上
		構造階層化概念による荷重伝達指標 Ustar（U*）を用いた自動車ドアパネル部の位相最適化	幺　　振鐸 大宮　正毅 杉山　太志 宮下　朋之 本田　正徳 河村　　力	慶応義塾大学大学院 慶応義塾大学 早稲田大学大学院 早稲田大学 技術研究所 同上
		湿式多板クラッチの高回転における引き摺りトルク上昇の検討	胡本　博史 為貝　仁志 曽利　　僚 甲斐出忠良 前川　耕太	技術研究所 同上 同上 同上 同上
		サイドミラー風切り音の音源予測に関する考察	高阪　文彦 山本　晃平 川北　正寿	ダッソーシステムズ（株） NVH 性能開発部 エンジニアリングシステム部
		シートベンチレーションによる温冷感改善効果の解析 ―被験者実験によるシート伝熱量の分析―	江本　　陸 岡部　力也 永野　秀明 白鳥　　英 島野健仁郎 吉田　　真 加嶋　利浩	東京都市大学 技術研究所 東京都市大学 同上 同上 装備開発部 同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2020.10.21-23	自動車技術会 2020 年秋季大会学術講演会	タイヤ回転を考慮した CFD 技術による デザインと両立する空気抵抗低減技術の開発	森川　陽介	車両実研部
2020.10.28-30	東北大学流体工学研究所 17th International Conference on Flow Dynamics 2020	Study on the Development of Detailed C2H4/C3H6 Surface Reaction Mechanism on Pt/Al2O3 Monolith Catalyst using Gaseous and Surface Species Measurements	Set Naing I Putu Angga Kristyawan D. Shimokuri S. Hinokuma H. Murakami Y. Matsumoto T. Omori M. Kawano M. Koutoku H. Yokohata A. Miyoshi	広島大学 同上 同上 産業技術総合研究所 走行・環境性能開発部 MBD 革新部 広島大学 MBD 革新部 同上 同上 広島大学
2020.11.2	自動車技術会 第 8 回インパクトバイオメカニクス部門委員会	Identification of influential factors for seatbelt kinematics in a collision and analysis of their influence degree to the kinematics	泉山　朋大 西田　周泰 岩永　秀幸 陳　　献 大木　順司 朝日　龍介 杉本　　繁 福島　正信	衝突性能開発部 山口大学 同上 同上 同上 衝突性能開発部 同上 同上
2020.11.11-13	日本機械学会 第 98 期流体工学部門講演会	固有直交分解による自動車に作用する空気力・流れ場の低周波変動特性の解析	末廣　隼一 中島　卓司 中村　優佑 清水　圭吾 平岡　武宜 小池　真人 今川　翔平 本村　浩一	広島大学大学院 同上 同上 技術研究所 同上 同上 同上 操安性能開発部
2020.11.12	日本金属学会・日本鉄鋼協会 第 70 回材質制御研究会	亜共晶 Al-Si 合金系における Mo 及び Zr のマイクロアロイング効果	魚見　知志	広島大学
2020.11.13	日本材料学会 第 12 回自動車用途コンポジットシンポジウム	ポリアミド樹脂を接着剤に用いて摩擦攪拌接合した CFRP/Al の引張せん断強度に及ぼす Al の板厚の影響	川上　将司 田中　和人 西口　勝也	同志社大学 同上 技術研究所
2020.11.16-18	日本機械学会・自動車技術会 第 31 回内燃機関シンポジウム	高圧燃料噴射を用いたガソリン HCCI 機関の燃焼モード切替支援燃焼の検討	藤川　竜也 神長　隆史 伊藤　直也 松尾　涼平 佐々木優太 堀　　隼基 山川　正尚	技術研究所 同上 パワートレイン技術開発部 同上 技術研究所 同上 同上
		NO2 添加の低温酸化・着火遅れに与える影響についての化学反応論的研究 第二報	葛　　晰遥 三好　　明 大野　諒平 原田　雄司	広島大学大学院 同上 技術研究所 同上
2020.11.17-18	Adaptive Corporation 3DEXPERIENCE® Modeling & Simulation Virtual Conference 2020	Mazda Development Process Innovation utilizing SFE Concept	木崎　　勇 松岡　智恵	衝突性能開発部 ボデー開発部
2020.11.20	自動車技術会 第 3 回ガソリン機関部門委員会	多段ガソリン高圧噴射を用いた圧縮着火の制御	伊藤　直也	パワートレイン技術開発部
2020.11.18-20	国際プラスチックフェア協議会 IPF Japan 2020 Virtual	車両軽量化を実現する自動車部品の開発事例	朝野　千明	技術研究所
2020.11.21	早稲田大学理工学術院総合研究所 第 40 回 早大モビリティシンポジウム	高圧ガソリン噴射による高圧縮比エンジンの燃焼改善技術の紹介	神長　隆史	技術研究所

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2020.11.21-22	計測自動制御学会 第 63 回 自動制御連合講演会	衝突回避を目的とした自動車のステアリングアシスト制御	濱谷　亮太 中村　文一 手塚　一成 波多野　崇 上條　賢治 佐藤　晶太	東京理科大学 同上 同上 統合制御システム開発本部 同上 同上
2020.11.24	広島県立広島皆実高校 LHR「キャリアガイダンス」	マツダとソウルレッドクリスタルとボク ～夢・志を抱くことの大切さ	中本　尊元	車両実研部
2020.11.24-25	日本塑性加工学会 第 170 回塑性加工学講座	自動車開発におけるプレス成形 CAE の活用	森澤　　誠	車体技術部
2020.11.25-26	東芝デジタルソリューションズ（株） 東芝オンラインカンファレンス 2020	企業の枠を超えた自動車の共同デジタル試作の実現に向けて ～マツダにおける MBD ～	末冨　隆雅	統合制御システム開発本部
2020.11.27	東京大学生産技術研究所 第 4 回 HPC ものづくり統合ワークショップ	自動車開発における HPC 活用事例と富岳への期待	平岡　武宜 小平　剛央 清水　圭吾	技術研究所 同上 同上
2020.12.1-14	（株）IDAJ IDAJ Online Conference 2020	modeFRONTIER を活用したバンパーのそり収縮精度向上への取り組み ～材料データのコリレーション手法の開発～	上西　宏幸	車両技術部
2020.12.2	東京工業大学 超スマート社会推進コンソーシアム 第 2 回 SSS マッチングワークショップ	超スマート社会に向けた活動状況やニーズのご紹介	武田　雄策	技術研究所
2020.12.2-4	日本燃焼学会 第 58 回燃焼シンポジウム	ノナン（C9H20）構造異性体の着火遅れ期間と燃焼速度の測定と反応経路解析	片山　明勇 山田　眞平 下栗　大右 Shenqyang SHY 八房　智顯 進士　勇太 Yu-Chao LIAO 乃生　芳尚 斉藤　史彦 三好　　明	広島大学 同上 同上 台湾國立中央大學 広島工業大学 広島大学 台湾國立中央大學 技術研究所 同上 広島大学
		混合層を考慮した衝撃波管の一次元詳細反応 CFD による着火遅れ期間予測	進士　勇太 下栗　大右 寺島　洋史 三好　　明 山田　眞平 八房　智顯 乃生　芳尚 斉藤　史彦	広島大学 同上 北海道大学 広島大学 同上 広島工業大学 技術研究所 同上
		高温高圧条件における赤外吸収法によるアセチレンの測定	藤田　陽太 山田　眞平 下栗　大右 河野　通治 本田　雄哉 植木　義治 横畑　英明 三好　　明	広島大学 同上 同上 MBD 革新部 同上 同上 同上 広島大学
		燃焼室部分可視化 RCM を用いたガソリンサロゲート燃料及び nC7H16 におけるノッキング挙動の観測	岩瀬　　巧 陳　　楚恣 下栗　大右 三好　　明 寺島　洋史 河野　通治 幸徳　正信 横畑　英明	広島大学 同上 同上 同上 北海道大学 MBD 革新部 同上 同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2020.12.2-4	日本燃焼学会 第 58 回燃焼シンポジウム	三元触媒担持材（CeOx）の酸素吸蔵能に及ぼす貴金属表面積の影響	大森　智仁 Set Naing 下栗　大右 日隈　聡士 村上　　浩 松本　有平 河野　通治 幸徳　正信 横畑　英明 三好　　明	広島大学 同上 同上 産業技術総合研究所 走行・環境性能開発部 MBD 革新部 同上 同上 同上 広島大学
		定容容器を用いた高温高圧環境下における火炎振動とエンドガスの自着火がノック強度に与える影響	常藤　飛鳥 西村　凌平 瀬尾　健彦 三上　真人 下栗　大右 河野　通治	山口大学 同上 同上 同上 広島大学 MBD 革新部
		セリア担持触媒の NOx 吸着に及ぼす貴金属量，触媒表面の影響	石橋　大輝 Set Naing 下栗　大右 日隈　聡士 村上　　浩 松本　有平 河野　通治 幸徳　正信 横畑　英明 三好　　明	広島大学 同上 同上 産業技術総合研究所 走行・環境性能開発部 MBD 革新部 同上 同上 同上 広島大学
		Study on the Development of CO/O_2 Surface Reaction Mechanism for Pt/CeOx Catalyst	Set Naing T. Omori D. Shimokuri S. Hinokuma Y. Matsumoto H. Murakami M. Kawano M. Koutoku H. Yokohata A. Miyoshi	広島大学 同上 同上 産業技術総合研究所 MBD 革新部 走行・環境性能開発部 MBD 革新部 同上 同上 広島大学
		ガソリンエンジンのノッキングとデトネーション	漆原　友則	エンジン性能開発部
2020.12.3	自動車技術会 第 3 回生産加工部門委員会 技術交流会	自動車塗装による環境負荷を大幅に低減する VOC 回収技術	加藤　　雄	車両技術部
2020.12.3-4	型技術協会 第 26 回型技術ワークショップ 2020 in ふじのくに	プレス金型設計における CAE 技術の活用	野口　マリ 丸山　秀幸 山口　大輔 坂本　貴則	車体技術部 同上 同上 同上
		CAE を活用したロバストな金型設計手法	切山　勇介	車両技術部
2020.12.4	大阪府工業協会	SKYACTIV-X の紹介とエンジンの将来展望〜マツダのクルマづくりと内燃機関の効率向上への挑戦〜	高松　宏志	エンジン性能開発部
2020.12.4-11	COMSOL COMSOL Conference 2020 Tokyo	材料モデルベースリサーチによる多孔質弾性体の音響特性を求める均質化アルゴリズムの実装	稲葉　賢二 畠山　　望 山本　崇史 山川　啓介 桂　　大詞 遊川　秀幸 大下　浄治	広島大学 広島大学／東北大学 広島大学／工学院大学 技術研究所 同上 同上 広島大学
2020.12.12	電気学会 2020 年 メカトロニクス制御研究会	クラッチを有する二慣性共振系の制約条件付きモデル予測制御によるスムーズな加速制御法	滝　　智洋 井脇　隆議 大石　　潔 横倉　勇希 山口　　晃 波多野　崇	長岡技術科学大学 同上 同上 同上 統合制御システム開発本部 同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2020.12.12	電気学会 2020 年 メカトロニクス制御研究会	クラッチを有する二慣性系の非線形モデル予測制御に基づく駆動力制御法	井脇　隆議 滝　　智洋 大石　　潔 横倉　勇希 山口　　晃 波多野　崇	長岡技術科学大学 同上 同上 同上 統合制御システム開発本部 同上
2020.12.16	早稲田大学 創造理工学部 総合機械工学科 熱エネルギー・反応工学	第 6 章：企業におけるエンジン開発	養祖　　隆	パワートレイン技術開発部
2020.12.16	型技術協会 第 5 回表面処理加工技術に関する調査研究委員会	お客様の輝きにつなげるマツダのモノづくり ～魂動デザイン実現に向けた生産技術革新～	大田　敦史	ツーリング製作部
2020.12.17-18	日本液体微粒化学会，日本エネルギー学会 第 29 回微粒化シンポジウム	噴霧の分裂・蒸発特性に及ぼす液体種の影響	倉持　　晃 原田　雄司 永澤　　健 瀬戸　祐利 山下　洋幸	技術研究所 同上 同上 同上 同上
		多噴孔ミニサックノズル内ストリングキャビテーションの支配無次元数	脇坂　優志 中道　勝久 木村　一至 三輪　　誠 宋　　明良 川口　幹祐 松本　有平 西田　恵哉 中島　　聖 和田　好隆	神戸大学 同上 同上 同上 同上 広島大学 同上 同上 MBD 革新部 同上
		曲率半径の異なる 90°一段曲がりノズルから噴出するオイルジェットの微粒化特性	三村　渓太 川口　幹祐 馬　　立娟 中山遼太郎 西田　恵哉 中島　　聖 尾形　陽一 幸徳　正信	広島大学 同上 同上 同上 同上 MBD 革新部 広島大学 MBD 革新部
2020.12.23	日本流体力学会 第 34 回数値流体力学シンポジウム	Implicit high-order filter による前処理を用いた自動車周りの低圧旋回渦の同定	中村　優佑 中島　卓司 平岡　武宜 清水　圭吾	広島大学大学院 同上 技術研究所 同上

3．社外寄稿

＊所属は原則発表時点を示す

寄稿誌名	巻・号・ページ	題目	発表者	所属
The Spine Journal	Vol.20 (2020), pp.614-620	Changes in the global spine alignment in the sitting position in an automobile	西田　周泰 泉山　朋大 朝日　龍介 岩永　秀幸 山縣　大樹 三原　惇史 中島　大介 今城　靖明 鈴木　秀典 舩場　真裕 杉本　　繁 福島　正信 坂井　孝司	山口大学 衝突性能開発部 同上 山口大学 同上 同上 同上 同上 同上 同上 衝突性能開発部 同上 山口大学
Radiation Physics and Chemistry	Volume 175, October 2020, 108110, doi: 10.1016/ j.radphyschem.2018.12.030	Ti K-edge XFAS investigation of lithium migration in lithium titanium oxide anode material under charge and discharge cycle	早川慎二郎 金田　敦徳 森　　啄也 Alvaro Munoz-Noval 三根生　晋 住田　弘祐	広島大学 同上 同上 同上 技術研究所 同上
Mechanical Engineering Journal	Vol.7, No.1, 2020, doi: https://doi.org/10.1299/ mej.19-00366	Aerodynamic drag change of simplified vehicle models influenced by passing vehicle	清水　圭吾 中島　卓司 平岡　武宜 中村　優佑 農沢　隆秀 土井　康明	技術研究所／広島大学大学院 広島大学大学院 技術研究所 広島大学大学院 技術研究所 広島大学大学院
The Journal of Physical Chemistry C	J. Phys. Chem. C 2020, 124, 5, 2953-2960	Experimental and computational studies of CO-NO reaction mechanism on rhodium nanoparticle for three way catalyst	松村　益寛 國府田由紀 重津　雅彦 山田　啓司 高見　明秀 甲斐　裕之 石元　孝佳	技術研究所 同上 同上 同上 同上 同上 広島大学
Journal of the Combustion Society of Japan	Vol.62 No.199 (2020) P64-73	Measurement and Numerical Simulation of Ignition Delay Time of C9H20 isomers	山田　眞平 﨑間　俊明 下栗　大右 三好　　明 遠藤　琢磨 八房　智顯 乃生　芳尚 斉藤　史彦	広島大学 同上 同上 同上 同上 広島工業大学 技術研究所 同上
Frontiers in Human Neuroscience	14:183, 2020. doi: 10.3389/fnhum.2020.00183	Shape of a Vehicle Windshield affects Reaction Time and Brain Activity during a Target Detection Task	笹岡　貴史 町澤　まろ 岡本　宜久 岩瀬　耕二 吉田　敏宏 道田奈々江 岸　　篤秀 千葉　正基 西川　一男 山脇　成人 農沢　隆秀	広島大学 同上 技術研究所 同上 同上 同上 同上 統合制御システム開発本部 技術研究所 広島大学 技術研究所
Journal of Visualization	Vol.23, pp. 793-804	Identification of the vortex around a vehicle by considering the pressure minimum	中村　優佑 中島　卓司 平岡　武宜 清水　圭吾 農沢　隆秀 土井　康明 陸田　秀実	広島大学 同上 技術研究所 同上 同上 広島大学 同上

寄稿誌名	巻・号・ページ	題目	発表者	所属
Materials Science & Engineering：A				
	Vol.780,139209	Microscopic defects formed during crack incubation, initiation and propagation processes causing hydrogen-related fracture of dual-phase steels	浅里　大地 溝上　達志 深堀　　貢 高井　健一	上智大学 技術研究所 同上 上智大学
Computational Material Science				
	Volume175,109610	Finite element simulation of the compressive response of additively manufactured structures with the large diameters.	Honghu Guo 竹澤　晃弘 本田　正徳 河村　　力 北村　　充	広島大学 同上 技術研究所 同上 広島大学
Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures（FFEMS）				
	Volume43, Issue10 Pages 2259-2269	Effect of jig constraint state during welding process on fatigue properties of Al/CFRP dissimilar welds and fatigue life evaluation based on singular stress	小川　裕樹 中原　文弥 曙　　紘之 菅田　　淳 田中耕二郎	広島大学 同上 同上 同上 技術研究所
Joining in Car Body Engineering 2020				
		Innovation of Body Damping Technology using Adhesive Bonding	阿部　　健 山本　研一	ボデー開発部 技術研究所
Journal of Applied Polymer Science				
	2019, 48367	NIR-shielding films based on PEDOT-PSS/polysiloxane and polysilsesquioxane hybrid	塚田　　学 中西　祐樹 甲斐　裕之 石元　孝佳 岡田　健太 安達　洋平 今榮　一郎 大下　浄治	広島大学／千葉大学 広島大学／技術研究所 技術研究所 横浜市立大学／広島大学 広島大学／技術研究所 広島大学 同上 同上
Materials Transactions				
	vol.61（2020）No.7, pp.1355-1363	Effect of Si Addition on Microstructure and Mechanical Properties of Al-1.5%Mn Alloys	Zeze Xiao Kazuhiro Matsugi Zhefeng Xu Yongbum Choi Kenjiro Sugio Nobuyuki Oda Jinku Yu	広島大学 同上 同上 同上 同上 技術研究所 燕山大学
IEEE Access				
	Vol.8, P215073-215090, 10.1109/ACCESS.2020.3040231	Is Human Brain Activity During Driving Operations Modulated by the Viscoelastic Characteristics of a Steering Wheel?: An fMRI Study	岡本　宜久 笹岡　貴史 定藤　規弘 福永　雅喜 山本　哲也 曽　　智 農澤　隆秀 山脇　成人 辻　　敏夫	技術研究所 広島大学 生理学研究所 同上 同上 広島大学 同上 同上 同上
Genes to Cells				
	Vol.25, Issue10, P695-702	Efficient and multiplexable genome editing using Platinum TALENs in oleaginous microalga, Nannochloropsis oceanica NIES-2145	栗田　朋和 諸井　桂之 岡崎久美子 坂本　　敦 佐久間哲史 山本　　卓 太田　啓之 岩井　雅子 清水　信介 野村　誠治 斎藤　史彦 前田真一郎 高見　明秀	広島大学 同上 同上 同上 同上 同上 東京工業大学 同上 同上 技術研究所 同上 同上 同上

寄稿誌名	巻・号・ページ	題目	発表者	所属
The PASC20 Conference				
	Article No.: 15, pp 1–10	A scalable framework for numerical simulation of combustion in internal combustion engines	Rahul Bale	RIKEN Center for Computational Science
			Wei Hsiang Wang	National Chung Hsing University
			Chung-Gang Li	Kobe University, RIKEN Center for Computational Science
			K. Onishi	RIKEN Center for Computational Science
			K. Uchida	Mazda Motor Corporation
			H. Fujimoto	同上
			R. Kurose	Kyoto University
			M. Tsubokura	Kobe University, RIKEN Center for Computational Science
Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)				
	pp.2257-2262	Spatial Perception and Operational Behavior of Drivers in Approaching to an Obstacle	河合真太郎	筑波大学
			廣川　暢一	同上
			上杉　直久	技術研究所
			古郡　　了	同上
			原　　利宏	同上
			鈴木　健嗣	筑波大学
Energies				
	Energies 2021, 14（1）, 94 https://www.mdpi.com/1996-1073/14/1/94	Effect of the curvature radius for 90-degree curved circular nozzle on internal flow and oil jet behavior	尾形　陽一	広島大学
			Guo Guanming	同上
			神垣　雅也	同上
			井上　祐哉	同上
			西田　恵哉	同上
			本郷　　均	MBD 革新部
			幸徳　正信	同上
			山本　　亮	同上
			横畑　英明	同上
京都大学電気関係教室 技術情報雑誌「Cue」				
	No.44（2019.09）, pp.10-16	マツダの目指す MBD と車両電装システム開発での適用事例	手島　由裕	電子性能開発部
日本複合材料学会誌				
	46 巻 6 号（2020）, PP.257-265	自動車衝突解析のための CFRP 積層部材の有限要素モデリングと損傷破壊解析	西　　正人	（株）JSOL
			西原　剛史	衝突性能開発部
			河村　　力	技術研究所
			齋藤　　啓	（株）JSOL
			金本　俊介	MBD 革新部
触媒学会誌				
	Vol.61 No.6	貴金属使用量低減を可能とする貴金属シングルナノ粒子触媒の開発	髙見　明秀	技術研究所
			原田浩一郎	同上
			松村　益寛	同上
軽金属学会誌				
	Vol.70 ,No1 ,P8-13	アルミニウム合金ダイカストと圧延材の摩擦撹拌点接合	杉本　幸弘	技術研究所
			田中耕二郎	同上
日本塑性加工学会・会誌「ぷらすと」				
	2020 年 3 巻 27 号 p. 156-160	高い衝突安全と軽量化を実現した，最適化手法による超軽量・高強度フレーム断面技術	本田　正徳	技術研究所
日本材料学会誌 材料				
	2020 年 69 巻 5 号 p.379-385	ポリアミド樹脂を接着剤に用いた CFRP Al の摩擦攪拌点接合	田中　和人	同志社大学
			丹羽　一将	同上
			片山　傳生	同上
			西口　勝也	技術研究所
利用課題実験報告書				
		貴金属粒子分散金属酸化物材料の分析	三根生　晋	技術研究所
			松村　益寛	同上

寄稿誌名	巻・号・ページ	題目	発表者	所属
第 57 回日本伝熱学会講演論文集				
	Paper ID「D121」	ノナン（C9H20）構造異性体の化学的着火遅れ期間および燃焼速度の測定と数値計算	片山　明勇 進士　勇太 山田　眞平 下栗　大右 三好　　明 Yi Rong Chen Yu-Chao Liao Shenqyang Shy 八房　智顯 斉藤　史彦	広島大学 同上 同上 同上 同上 台湾國立中央大學 同上 同上 広島工業大学 技術研究所
産報出版 月刊「溶接技術」				
	2020.6 月号 vol68	自動車における構造接着技術の動向と課題	麻川　元康 山本　研一 氷室　雄也 中川　興也	技術研究所 同上 同上 同上
日刊工業新聞				
	14 面 , 2020 年 8 月 7 日付（2020）	第 70 回自動車技術会賞　技術開発賞　受賞者の声	山本　研一 吉田　智也 鍵元　皇樹 小林　敏雄	技術研究所 ボデー開発部 車体技術部 サンスター技研（株）
月刊『クリーンエネルギー』				
	Vol.29，No.9，P12－20	将来に向けた自動車の熱マネージメント開発への取り組み	小池　祐輔 種平　貴文 研井　　暁 山賀　勇真 谷中　克年 三国　祐亮	技術研究所 同上 同上 同上 同上 同上
日本機械学会論文集				
	Vol.86, No.887, 2020, 19-00415	吸音材内部における散逸エネルギーの寄与解析	山本　崇史 桂　　大詞 久保田　寛	工学院大学 技術研究所 同上
	Vol.86, No.889, 2020, 20-00073	均質化法による吸音材微視構造の寸法最適化	山本　崇史 桂　　大詞 久保田　寛	工学院大学 技術研究所 同上
季刊 中国創研				
	2020 vol.24-4 No.92, 2020 vol.24-5 No.93	感性の豊かなハピネス社会実現のための脳科学・光技術・情報通信技術による感性の可視化とその活用の最前線　― 感性 COI 拠点の取り組み ―	岸　　篤秀 西川　一男	技術研究所 同上
	2020 vol.24-5 No.93	心理学を利用した自動車感性機能の開発	久保　賢太	車両実研部
日本機械学会ニュースレター				
	No.91	エンジン燃焼室内の壁面熱伝達現象の解明に関する研究	原田　雄司 内田　健司	技術研究所 同上
触媒の劣化対策，長寿命化とその調整技術				
	P.179-189	自動車用排出ガス浄化用触媒の劣化対策	髙見　明秀	技術研究所
溶接学会誌				
	89 巻 6 号 P409-415	防錆性能向上を実現するアーク溶接材料とプロセス	井海　和也 山﨑　亮太 横田　泰之 田中　正顕 斉藤　直子 深堀　　貢	（株）神戸製鋼所 同上 同上 シャシー開発部 同上 同上

寄稿誌名	巻・号・ページ	題目	発表者	所属
第 11 回日本複合材料会議（JCCM-11）論文集				
	講演番号 1A-05	繊維強化樹脂の異方性を活用した自動車車体の剛性・減衰性の向上技術に関する検討	西田　健二 本田　正徳 河村　　力 氷室　雄也 横関　智弘 樋口　　諒 杉山　哲也 島田　政紀	技術研究所 同上 同上 同上 東京大学 同上 日鉄ケミカル＆マテリアル（株） 同上
	講演番号 1B-16	粘弾性マルチスケール解析を用いた振動特性予測	大宅　　匠 横関　智弘 樋口　　諒 西田　健二 本田　正徳 河村　　力 氷室　雄也	東京大学 同上 同上 技術研究所 同上 同上 同上
日本農芸化学会 2020 年度大会論文集				
	発表番号：3B08a01	真核微細藻類 Nannnochloropsis におけるプラチナ TALENs を利用した高効率外来遺伝子フリーゲノム編集ツールの開発	栗田　朋和 諸井　桂之 岡崎久美子 坂本　　敦 佐久間哲史 山本　　卓 太田　啓之 岩井　雅子 野村　誠治 斎藤　史彦 高見　明秀	広島大学 同上 同上 同上 同上 同上 東京工業大学 同上 技術研究所 同上 同上
第 61 回日本植物生理学会年会論文集				
	発表番号：2pB09	Transgene-free genome editing using removal highly active Platinum TALEN plasmids in oleaginous microalga, Nannochloropsis	栗田　朋和 諸井　桂之 岡崎久美子 坂本　　敦 佐久間　史 山本　　卓 岩井　雅子 太田　啓之 高見　明秀 野村　誠治 斉藤　史彦	広島大学 同上 同上 同上 同上 同上 東京工業大学 同上 技術研究所 同上 同上
自動車技術会 2020 年春季大会学術講演会予稿集				
	Paper No. 004, No.2-20	加減速領域における貴金属シングルナノ粒子触媒の NOx 浄化メカニズム解明（第 2 報）	松村　益寛 重津　雅彦 中西　美恵 國府田由紀 住田　弘祐 山田　啓司	技術研究所 同上 同上 同上 同上 同上
	Paper No. 042, No.18-20	逆解析によるエンジン吸入空気の冷却検討	鈴野　浩大 外薗　　徹 楢原　和明 丸本　真玄 前川　耕太	技術研究所 同上 同上 同上 同上
	Paper No. 055, No.26-20	運転操作の変容によるドライバの異常予兆検知方法の検討	桑原潤一郎 岩下　洋平 山本　康典 一杉　正仁 奥野　隆司 石黒　　望	技術研究所 同上 同上 滋賀医科大学 近江温泉病院 同上

寄稿誌名	巻・号・ページ	題目	発表者	所属
自動車技術会 2020 年春季大会学術講演会予稿集				
	No.26-20	視線挙動の変容からの体調急変の予兆推定方法の検討	岩瀬　耕二 福井亜希子 岩下　洋平 山本　康典 一杉　正仁 桐畑　将司 仲野　剛由	技術研究所 同上 同上 同上 滋賀医科大学 近江温泉病院 同上
	Paper No. 033, No.33-20	先進制御としてソフトセンサを用いた空気充填効率を推定する研究報告	小川　史恵 桑原　一徳 松江　浩太 清水　　良 和田　正義	技術研究所 パワートレイン開発本部 同上 同上 東京農工大学
	Paper No. 083, No.37-20	モデルベースリサーチ（MBR）による車両と材料をつなぐ解析技術の開発	氷室　雄也 本田　正徳 西田　健二 藤元　伸悦	技術研究所 同上 同上 日鉄ケミカル＆マテリアル（株）
	Paper No. 124, No.57-20	NO2 添加の低温酸化・着火遅れに与える影響についての化学反応論的研究	葛　　晰遥 三好　　明 大野　諒平 原田　雄司	広島大学 同上 技術研究所 同上
	No.102-20	広島地域における MBD の展開について －ひろ自連での取り組みの概要－	村岡　　正 足立　智彦	R&D 技術管理本部 統合制御システム開発本部
	No.102-20	Plant Model Interface Guideline Proposal for Automotive	足立　智彦 小森　　賢 平松　繁喜	統合制御システム開発本部 同上 同上
自動車技術会論文集				
	vol.51, No.4, pp.649-654	多段ガソリン高圧噴射を用いた圧縮着火燃焼の制御	伊藤　直也 神長　隆史 内田　健児 佐々木優太 恩田　貴浩 藤川　竜也 養祖　　隆 山川　正尚	パワートレイン技術開発部 同上 同上 同上 同上 同上 同上 同上
	vol.51, No.4, pp.707-712	逆解析によるエンジン吸入空気の冷却検討	鈴野　浩大 外薗　　徹 楢原　和明 丸本　真玄 前川　耕太	技術研究所 同上 同上 同上 同上
	Vol.51,No.5, pp. 888-893	加減速領域における貴金属シングルナノ粒子触媒の Nox 浄化メカニズム解明	松村　益寛 重津　雅彦 中西　美恵 國府田由紀 住田　弘祐 山田　啓司	技術研究所 同上 同上 同上 同上 同上
	Vol51, No.6, pp.1006-1011	視線挙動の変容に基づく体調異常推定方法の検討	岩瀬　耕二 福井亜希子 岩下　洋平 山本　康典 一杉　正仁 桐畑　将司 仲野　剛由	技術研究所 同上 同上 同上 滋賀医科大学 近江温泉病院 同上
	Vol51, No.6, pp.1075-1081	先進制御としてソフトセンサを用いた空気充填効率を推定する研究報告	小川　史恵 桑原　一徳 松江　浩太 清水　　良 和田　正義	技術研究所 パワートレイン開発本部 同上 同上 東京農工大学

寄稿誌名	巻・号・ページ	題目	発表者	所属
自動車技術会論文集				
	Vol52, No.1, pp.7-12	NO2 添加の低温酸化・着火遅れに与える影響についての化学反応論的研究	葛　　晰遥 三好　　明 大野　諒平 原田　雄司	広島大学 同上 技術研究所 同上
自動車技術会誌				
	Vol.74, No4, 2020	デザインと空気抵抗低減の両立に向けた新しい渦構造同定手法	中村　優佑 平岡　武宜 清水　圭吾 農沢　隆秀 中島　卓司	技術研究所 同上 同上 広島大学 同上
	Vol. 74, No. 6, 2020	火花点火制御圧縮着火エンジンの開発に適用する燃焼予測技術	河野　通治 横畑　英明 幸徳　正信 植木　義治 本田　雄哉 谷井　透汰	MBD 革新部 同上 同上 同上 同上 同上
	Vol.74, No.6, 2020	SKYACTIV-X の SPCCI 燃焼を実現する技術	井上　　淳	エンジン性能開発部
	Vol.74，No.7, 2020	車両腐食環境の定量化技術と分析手法の開発	山根　貴和 福田　克弘 中本　尊元 喜久山良弐	車両実研部 同上 同上 同上
	Vol.74, No.10, 2020	火花点火制御圧縮着火を導入した新型2.0Lガソリンエンジンの開発（第 70 回自技会 技術開発賞受賞寄稿）	末岡　賢也	エンジン性能開発部
	Vol.74, No.10, 2020	高い衝突安全と軽量化を実現した，構造接着による車体振動減衰技術	山本　研一 吉田　智也 三好　雄二 鍵元　皇樹 小林　文雄	技術研究所 ボデー開発部 NVH 性能開発部 車体技術部 サンスター技研（株）
	Vol.74, P99-104	エンジン燃焼室内の壁面熱伝達現象の解明およびモデル構築	原田　雄司 内田　健司	技術研究所 同上
日本音響学会 2020 年春季研究発表会論文集				
	1-Q-39	車内音響特性を用いた聴感印象スパースモデルに関する検討	井野場春香 石光　俊介 五十嵐優司 清水　　朗 青木　武史 佐藤　弥生 小池　　遥 若松　功二 山中　尋詞 藤本麻由美	広島市立大学 同上 パイオニア（株） 同上 同上 同上 同上 電子性能開発部 同上 同上
第 80 回 分析化学討論会講演要旨集				
	pp.252	クリアコート塗膜におけるヒンダートアミン系光安定剤の機能発現とその寿命の評価	駒口　健治 早川慎二郎 河邉　光祥 湊　　允哉	広島大学 同上 技術研究所 同上
ENEX2020 第 44 回地球環境とエネルギーの調和展				
	P.28	熱流れの計測解析技術の開発／電気駆動車の計測実施／自動車の熱流れモデルの構築	山賀　勇真	技術研究所
ダイバーシティ事業 HP				
		国際型ダイバーシティ研究環境実現プログラム	斉藤　直子	技術研究所
東京工業大学学術国際情報センター HP				
		車載レーダにおけるターゲット散乱とレーダ反射断面積の FDTD 法による詳細解析	山本　雅史	技術研究所

寄稿誌名	巻・号・ページ	題目	発表者	所属
日本燃焼学会誌				
	Vol.62, No.201, 2020, pp.24-31	火花点火制御圧縮着火を導入した新型ガソリンエンジンの燃焼技術	河野　通治 漆原　友則 末岡　賢也 井上　　淳 西田　正美 中原　康志 幸徳　正信 横畑　英明	MBD 革新部 エンジン性能開発部 同上 同上 エンジン設計部 同上 MBD 革新部 同上
月刊省エネルギー誌				
	Vol.72, No.9（2020）, pp.36-40	M Hybrid 技術について	森本　昌介	PT 制御システム開発部
日本大学理工学部学内誌「理工サーキュラー」				
	Vol.49 2020 WINTER No.183 p.9	研究力をつけて羽ばたこう	伊藤　直也	パワートレイン技術開発部
溶接学会誌				
	第 89 巻（2020），第 6 号，pp.9-15	防錆性能向上を実現するアーク溶接材料とプロセス	井海　和也 山﨑　亮太 横田　泰之 田中　正顕 斎藤　直子 深堀　　貢	（株）神戸製鋼所 同上 同上 シャシー開発部 技術研究所 同上
JETI				
	vol.68, No.7（2020）, pp.33-36	バイオエンプラ新意匠 2 層成形技術の開発	一原　洋平	装備開発部
車載テクノロジー				
	vol.8, No.3（2020）, pp.27-31	バイオエンプラ新意匠 2 層成形技術の開発	一原　洋平	装備開発部
日本知的財産協会（JIPA）刊行資料				
	No.496	データ利活用に関わるオープンイノベーションにおける契約事例（ライセンス第 1 委員会）	佐藤　　徹 川島　正史 廣幸百合子 伊野　孝太 開元　裕子 佐藤　里奈 西谷　明子 細谷　弘文 松本　茂樹 吉田　大輔 芦　　毅 渡辺　直樹	知的財産部 三菱日立パワーシステムズ（株） 東芝（株） ソニー（株） （株）ソシオネクスト シャープ（株） 三菱電機（株） UD トラックス（株） トヨタ自動車（株） キヤノンマーケティングジャパン（株） 日産自動車（株） （株）ワコム
知財管理				
	vol.72, No.5, 2020, pp.1-2	巻頭言「次の 100 年に向けて…」	工藤　秀俊	マツダ（株）
月刊 画像ラボ				
	2020 年 1 月号	製造ラインの知能化 〜検査工程での取り組み〜	市本　秀則	生産企画部
第 26 回型技術ワークショップ 2020in ふじのくに講演論文集				
	pp.142-143	プレス金型設計における CAE 技術の活用	野口　マリ 丸山　秀幸 山口　大輔 坂本　貴則	車体技術部 同上 同上 同上
型技術				
	vol.35, No.6, 2020, pp.91-95	「走る歓び」の実現に向けたシリンダーヘッド寸法のモデルベース開発	梅原　美友 米澤　英樹 丸尾　幸治 末永　啓太	パワートレイン技術部 同上 同上 同上

寄稿誌名	巻・号・ページ	題目	発表者	所属
型技術				
	vol.35, No.7, 2020, pp.46-47	走る歓びを実現するダイカスト素材寸法のモデルベース開発	杉浦　千尋 河野　一郎 村岡　好彦 菅谷　　智	パワートレイン技術部 同上 同上 同上
型技術者会議講演論文集				
	vol.34, pp.108-109	走る歓びを実現するダイカスト素材寸法のモデルベース開発	杉浦　千尋 河野　一郎 村岡　好彦 菅谷　　智	パワートレイン技術部 同上 同上 同上
型技術ワークショップ 2020 講演論文集				
	pp.102-103	CAE を活用したロバストな金型設計手法	切山　勇介 得平　吉輝 岩本　道尚	車両技術部 同上 同上
型技術者 2020 年 7 月号				
	pp.74-75	デジタル動作解析による匠開発システムの構築	久保　祐貴 須賀　　実 佐伯　千春 大谷　卓史	ツーリング製作部 同上 同上 同上
塑性加工学講座				
	第 170 回（2020）, pp.63-74	自動車開発におけるプレス成形 CAE の活用	森澤　　誠	車体技術部
プラスチック成形加工学会第 31 回年次大会講演論文集				
	pp.165-166	バンパーにおける反り収縮変形予測精度向上の為の，最適化を用いた材料データコリレーション手法の開発	上西　宏幸 田中　慶和 阿部　光教 鈴木　広之	車両技術部 同上 同上 同上
2020 年度省エネ大賞（省エネ事例部門）全応募事例集				
	pp.48-54	自動車塗装における CO2 と VOC を同時削減する VOC 回収技術	加藤　　雄 篠田　雅史	車両技術部 同上
IVI 業務シナリオ集 2020				
	2020 年版 4 月	5G を睨んだ AGV システムの開発	藤岡　義弘	車両技術部
日本機械学会 中国四国支部 第 58 期総会・講演論文集				
		応答曲面生成のための効率的なデータ点収集アルゴリズムの開発	大住　勇輝 荒川　雅生 佛圓　哲朗 平松　繁喜 宇根﨑　弘 近藤　秀一	香川大学 同上 同上 統合制御システム開発本部 同上 電子基盤開発部

編　集　委　員　会

委員長	神八　俊夫	商品戦略本部 技術企画部
編集委員	笠原　康一	商品戦略本部 技術企画部
	望月　英生	商品戦略本部 技術企画部
	永柄　邦次	商品戦略本部 技術企画部
	藤岡　泰之	商品本部 商品開発企画部
	橋本　亮一	デザイン本部 デザイン開発推進部
	松村　　肇	車両開発本部 車両開発推進部
	合志剣之助	車両開発本部 シャシー開発部
	波多野　崇	統合制御システム開発本部
	原澤　　渉	パワートレイン開発本部 ドライブトレイン開発部
	市川　和男	技術研究所
	杉山　裕基	技術本部 生産企画部
	柿沢　修成	広報本部 グローバル広報企画部
編集幹事	温品　一雄	商品戦略本部 技術企画部

マツダ技報　第38号

発　行　2021年12月
発行人　廣瀬　一郎
編集人　神八　俊夫
事務局　温品　一雄
発行所　マツダ株式会社
　　商品戦略本部　技術企画部
　　〒730-8670
　　広島県安芸郡府中町新地3番1号
　　電話　082（565）2198

©2021 マツダ株式会社（禁無断転載）

ISSN 2186-3490

Mazda Technical Review No.38

December 2021
Publisher　Ichiro Hirose
Editor　Toshio Kamihachi
Bureau　Kazuo Nukushina
Publishing office　Technology Planning Dept.
Product Strategy Div.
Mazda Motor Corporation
3-1 Shinchi, Fuchu-cho Akigun,
Hiroshima 730-8670, Japan